

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Maurício Baraciol Gasparin

**MULTIPLICAÇÃO SINCRONIZADA DA FREQUÊNCIA DE
GERADORES ELÉTRICOS ACIONADOS POR FONTES PRIMÁRIAS
COM FLUXOS DE BAIXA VELOCIDADE**

Santa Maria, RS
2020

Maurício Baraciol Gasparin

**MULTIPLICAÇÃO SINCRONIZADA DA FREQUÊNCIA DE GERADORES
ELÉTRICOS ACIONADOS POR FONTES PRIMÁRIAS COM FLUXOS DE BAIXA
VELOCIDADE**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Felix Alberto Farret, PhD

Santa Maria, RS
2020

Gasparin, Maurício Baraciol
MULTIPLICAÇÃO SINCRONIZADA DA FREQUÊNCIA DE GERADORES
ELÉTRICOS ACIONADOS POR FONTES PRIMÁRIAS COM FLUXOS DE
BAIXA VELOCIDADE / Maurício Baraciol Gasparin.- 2020.
124 p. ; 30 cm

Orientador: Felix Alberto Farret
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2020

1. Multiplicação de Frequência 2. Energia Renovável 3.
Máquinas Elétricas Sincronizadas I. Farret, Felix
Alberto II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

©2020

Todos os direitos autorais reservados a Maurício Baraciol Gasparin. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: CEP 97105-900

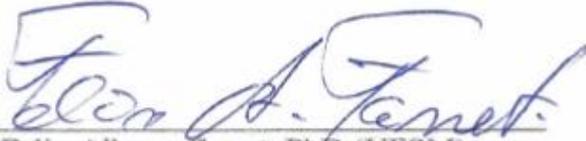
Fone: (55) 984185989; E-mail: mauricio.gaspa@gmail.com

Maurício Baraciol Gasparin

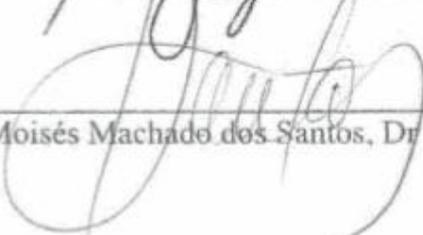
MULTIPLICAÇÃO SINCRONIZADA DA FREQUÊNCIA DE GERADORES ELÉTRICOS ACIONADOS POR FONTES PRIMÁRIAS COM FLUXOS DE BAIXA VELOCIDADE

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovada em 30 de setembro de 2020:


Felix Alberto Farret, PhD (UFSM)
(Presidente/Orientador)


Frank Gonzatti, Dr (UFSM)


Moisés Machado dos Santos, Dr (UNIJUI)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por me ensinar a viver a cada dia de minha vida, me ajudando em meio às dificuldades.

Agradeço a meus pais Wilmar e Antonieta, pelo amor, sacrifício e que sempre me incentivaram aos estudos.

Ao meu orientador, professor Felix A. Farret, pela excelente orientação, paciência e compreensão e também por todo apoio que tem sido importante nesta fase de minha vida.

Agradeço ainda a todos os amigos que estiveram ao meu lado durante este curso, a Deus por tudo que concerne a minha formação e minha carreira.

A todos os colegas e demais professores do CEESP pelo convívio e troca de experiências. Um agradecimento especial ao colega Moises Machado do Santos pelas contribuições durante o trabalho. Ao colega Mauro Rodrigues pelo seu incentivo e também a todos os colegas que de uma forma ou de outra contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em especial ao CEESP-CT, por fornecer o espaço e recursos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

MULTIPLICAÇÃO SINCRONIZADA DA FREQUÊNCIA DE GERADORES ELÉTRICOS ACIONADOS POR FONTES PRIMÁRIAS COM FLUXOS DE BAIXA VELOCIDADE

AUTOR: MAURÍCIO BARACIOL GASPARIN

ORIENTADOR: FELIX ALBERTO FARRET, PhD

Santa Maria, 30 de setembro de 2020.

Esta dissertação propõe uma forma de aumento da frequência de máquinas elétricas acionadas por fontes alternativas de baixa velocidade do fluido acionador, como o vento e a água. Este trabalho apresenta uma técnica de multiplicação de frequência da tensão em cargas elétricas de forma estável e segura usando dois geradores elétricos sincronizados mecanicamente. Para comprovar tal técnica, esta dissertação propõe o uso de duas máquinas elétricas conectadas mecanicamente num modo em oposição de fase e acionadas por um único eixo de tal forma que se possa adicionar sincronizadamente as suas frequências. A máquina primária acionadora poderá ser de qualquer tipo [BLDC (Brushless DC), síncrona ou de indução do tipo gaiola de esquilo ou bobinada]. A máquina secundária a ser acionada deverá ter necessariamente ambos, rotor e estator, bobinados. Os terminais das máquinas primária e secundária deverão estar ligados em contrafase. A frequência resultante poderá ser então compatível com a da rede pública ou o mais próximo possível dela. Esta técnica poderá reduzir a relação de velocidades das caixas de engrenagens mecânicas ou evitar a necessidade de frequências de chaveamento muito altas dos conversores eletrônicos de potência. Essa nova alternativa, além de reduzir a proporção dos multiplicadores de velocidade, poderá até eliminar totalmente sua necessidade na geração distribuída. Foram feitos muitos testes de laboratório com esta forma de multiplicação de frequência usando cargas resistivas, indutivas e capacitivas e também conexões com a rede pública de distribuição de energia elétrica. A modelagem e as simulações dos circuitos propostos foram realizadas no software PSIM para verificar os testes experimentais de laboratório.

Palavras-chave: Multiplicação de Frequência, Energia Renovável, Máquinas Elétricas Sincronizadas.

ABSTRACT

Master Dissertation
Post-graduate Program in Electrical Engineering
Federal University of Santa Maria

SYNCHRONIZED MULTIPLICATION OF THE FREQUENCY OF ELECTRIC GENERATORS DRIVEN BY PRIMARY SOURCES WITH LOW SPEED FLUXES

AUTHOR: MAURÍCIO BARACIOL GASPARIN

RESEARCH SUPERVISOR: FELIX ALBERTO FARRET, PhD

Santa Maria, September 30th, 2020.

This dissertation proposes a way to increase the frequency of electric machines driven by alternative sources with low speed of the driving fluid, such as wind and water. This work presents a technique for multiplying voltage frequency in electrical loads in a stable and safe way using two mechanically synchronized electrical generators. To prove this technique, this dissertation proposes the use of two electrical machines mechanically connected in phase opposition and driven by a single axis in such a way that their frequencies can be added synchronously. The primary driving machine can be of any type [BLDC (Brushless DC), synchronous or induction squirrel cage or coiled]. The secondary machine to be driven must necessarily have both, rotor and stator, wound. The windings of the primary and secondary machines must be connected in a counter phase mode. The resulting frequency may then be more compatible with that of the public network or as close as possible. This technique can reduce the gear ratio of mechanical gearboxes or avoid the need for very high switching frequencies of electronic power converters. This new alternative, in addition to reducing the proportion of speed multipliers, may even completely eliminate them for distributed generation. There have been many laboratory tests with this form of frequency multiplication using resistive, inductive and capacitive loads and connections to the public electricity distribution network. The modeling and simulations of the proposed circuits were performed in the PSIM software to verify the experimental laboratory tests.

Keywords: Frequency Multiplication, Renewable Energy, Synchronized Electric Machines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 — Controle do fator de potência e da velocidade	26
Figura 2.2 — Esquema dos enrolamentos do motor Schräge.....	27
Figura 2.3 — Configuração do DFIG em cascata	28
Figura 2.4 — Representação genérica para geradores síncronos	32
Figura 2.5 — Circuito equivalente por fase de um gerador PMSG	36
Figura 2.6 — Modos de operação da máquina de indução	37
Figura 2.7 — Tensão terminal do gerador em função da corrente no capacitor	38
Figura 2.8 — Circuito equivalente por fase de um gerador de indução	40
Figura 2.9 — Representação do circuito equivalente com a inclusão de uma tensão externa do rotor	42
Figura 3.1 — Duas máquinas sincronizadas mecanicamente por um eixo comum em oposição de rotação.....	44
Figura 3.2 — Oposição de fases dos geradores elétricos	45
Figura 3.3 — Relação matemática entre as velocidades ω_1 , ω_2 e ω_m	50
Figura 3.4 — Conexões elétrica entre as máquinas	52
Figura 3.5 — Diagrama de vetores, oposição de fases nos geradores elétricos	52
Figura 3.6 — Simulação com MS e MI para um número distinto de polos.....	54
Figura 3.7 — Circuito equivalente do gerador de indução com carga em paralelo	57
Figura 3.8 — Curva de magnetização para máquina 1.....	61
Figura 4.1 — Montagem da simulação no PSIM com o gerador PMSM	64
Figura 4.2 — Formas das ondas de saída da carga e do gerador para 803 rpm	66
Figura 4.3 — Formas de onda de saída de carga e gerador para 956 rpm	66
Figura 4.4 — Montagem no PSIM para a sincronização mecânica dos geradores elétricos....	67
Figura 4.5 — Formas de onda de saída de carga e gerador para 732 rpm	69
Figura 4.6 — Formas de onda de saída de carga e gerador para 961 rpm	69
Figura 4.7 — Montagem no PSIM para simulação da sincronização mecânica de geradores elétricos.....	70
Figura 4.8 — Formas de onda de saída de carga e gerador para 756 rpm	72
Figura 4.9 — Formas de onda de saída de carga e gerador para 910 rpm	72
Figura 4.10 — Montagem no PSIM para a simulação da sincronização mecânica de dois geradores elétricos	74
Figura 4.11 — Formas de onda para geradores com 2x4 polos a 1927 rpm.....	75
Figura 4.12 — Formas de onda para geradores com 4x4 polos a 1546 rpm.....	76
Figura 4.13 — Formas de onda para geradores com 6x4 polos a 1030 rpm.....	77
Figura 4.14 — Formas de onda para geradores com 8x4 polos a 749 rpm.....	77
Figura 4.15 — Montagem de simulação no PSIM para as máquinas sincronizadas mecanicamente alimentando uma carga	78
Figura 4.16 — Tensão de saída nas máquinas com carga resistiva.....	79
Figura 4.17 — Tensão na carga e correntes de entrada e saída na máquina 2	80
Figura 4.18 — Tensão de linha na saída das máquinas e rotação	81
Figura 4.19 — Corrente na carga e no estator da máquina 2	81
Figura 4.20 — Tensão de saída nas máquinas com carga capacitiva.....	82
Figura 4.21 — Tensão e corrente de saída nas máquinas com carga capacitiva.....	83
Figura 5.1 — Montagem de laboratório de geradores sincronizados mecanicamente	84
Figura 5.2 — Formas de onda de entrada e saída obtidas em laboratório para uma das fases do gerador de indução com rotor bobinado (770 rpm - 50,90 Hz).....	85
Figura 5.3 — Formas de onda de entrada e saída obtidas em laboratório para uma das fases do gerador de indução com rotor bobinado (914 rpm - 60,60 Hz)	86

Figura 5.4 — Montagem em laboratório para simular dois geradores sincronizados mecanicamente.....	87
Figura 5.5 — Formas de onda de tensão em máquinas com 2x4 polos.....	88
Figura 5.6 — Formas de onda da tensão em máquinas com 4x4 polos.....	89
Figura 5.7 — Formas de onda de tensão em máquinas com 6x4 polos.....	89
Figura 5.8 — Resultados laboratoriais para máquinas de 8x4 polos.....	90
Figura 5.9 — Tensão na saída das máquinas alimentando uma carga resistiva.....	91
Figura 5.10 — Tensão e corrente na carga resistiva.....	92
Figura 5.11 — Formas de onda de corrente de estator e rotor da máquina 2.....	92
Figura 5.12 — Tensão em ambas as máquinas para carga indutiva.....	93
Figura 5.13 — Tensão e corrente em uma fase da carga indutiva.....	94
Figura 5.14 — Forma de onda de corrente de entrada e saída na máquina 2.....	94
Figura 5.15 — Tensão na saída das máquinas com carga capacitiva.....	95
Figura 5.16 — Tensão e corrente de linha na carga capacitiva.....	96
Figura 5.17 — Correntes no estator e na saída do rotor da máquina 2 para carga capacitiva.....	96
Figura 5.18 — Montagem em laboratório para conexão dos geradores sincronizados mecanicamente em paralelo com a rede.....	98
Figura 5.19 — Diagrama elétrico de montagem para a conexão com a rede.....	99
Figura 5.20 — Tensão nas máquinas no instante do paralelismo.....	102
Figura 5.21 — Tensão de estator e rotor na máquina 2 durante o paralelismo.....	103
Figura A.1 — Geração de Energia Elétrica por Fonte no Brasil – (participação em 2018)...	112
Figura A.2 — Expectativa para capacidade instalada global em 2040.....	113
Figura A.3 — Configuração básica de um hidrogerador.....	114
Figura A.4 — Configuração básica da geração de energia eólica.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 — Frequências resultantes para um número distinto de polos	54
Tabela 3.2 — Dados de placa para as máquinas	56
Tabela 3.3 — Parâmetros do modelo gerado no software de simulação.....	57
Tabela 3.4 — Determinação das constantes K_s	60
Tabela 3.5 — Valores de tensão e corrente na curva de magnetização.....	60
Tabela 4.1 — Parâmetros para a turbina eólica.....	63
Tabela 4.2 — Parâmetros da máquina de indução usada no modelo PSIM.....	65
Tabela 4.3 — Parâmetros do gerador PMSG	65
Tabela 4.4 — Parâmetros das duas máquinas de indução usada no modelo PSIM	68
Tabela 4.5 — Parâmetros da máquina de indução usada no modelo PSIM.....	71
Tabela 4.6 — Parâmetros da máquina síncrona usada no modelo PSIM.....	71
Tabela 4.8 — Dados de placa para a máquina 1	74
Tabela 4.9 — Parâmetros da máquina de indução com rotor bobinado usada no modelo PSIM	75
Tabela 5.1 — Valores práticos de teste para diferentes velocidades da turbina	86
Tabela 5.2 — Distribuição de potência entre geradores e barramento.....	101
Tabela 5.3 — Grandezas entre máquina 1 e máquina 2 durante as etapas.....	102
Tabela A.1 — Resultado de ensaios para motor de 2 polos e 3/4 CV.....	120
Tabela A.2 — Resultado de ensaios para motor de 4 polos e 0,46 CV.....	121
Tabela A.3 — Resultado de ensaios para motor de 6 polos e 0,38 CV.....	121
Tabela A.4 — Resultado de ensaios para motor de 8 polos e 0,25 CV.....	122

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BLDC	Brushless Direct Current
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
DFBM	Doubly-Fed Brushless Machine (Máquina sem escova e alimentação dupla)
DFDC	Doubly-fed induction motor differential cascade (Cascata diferencial do motor de indução duplamente alimentado)
DFIG	Doubly fed induction generator (Gerador de indução duplamente alimentado)
FMM	Força magnetomotriz
GI	Gerador de indução
IP	Imãs permanentes
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)
IRENA	International Renewable Energy Agency (Agência Internacional de Energias Renováveis)
kW/m	Quilowatt por metro
MCM	Modular Cascade Machines (Máquinas Modulares em Cascata)
MI	Máquina de indução
MIT	Máquina de indução trifásica
MS	Máquina síncrona
MW	Megawatt
OPV	Organic Photovoltaic Cells (Células Fotovoltaicas Orgânicas)
PET	Tereftalato de polietileno
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Motor (Gerador Síncrono de Imãs Permanentes)
REI	Redes Elétricas Inteligentes
rpm	Rotações por minuto
WECS	Wind energy conversion systems (Sistemas de Conversão de Energia Eólica)
WRIM	Wound rotor induction machine (Máquina de Indução com Rotor Bobinado)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área varrida pelas hélices das turbinas
C_p	Coeficiente de potência
E_A	Tensão de armadura
E_{Af}	Tensão de armadura por fase
f_{se}	Frequência elétrica de estator
I_A	Corrente de armadura
i_a, i_b e i_c	Correntes de fase instantânea
I_{ef}	Corrente eficaz de fase
I_F	Corrente de campo
L_A	Indutância de armadura
L_d	Indutância de eixo direto
L_q	Indutância de eixo em quadratura
I_d	Corrente de eixo direto
i_q	Corrente de eixo em quadratura
n_m	Velocidade mecânica do campo magnético
p	Número de polos
P	Potência aerodinâmica do rotor
p_a, p_b e p_c	Potência instantânea de fase
P_m	Potência mecânica
P_{wind}	Potência disponível pelo vento
R_A	Resistência de armadura
T_e	Torque elétrico
T_m	Torque mecânico
v_a, v_b e v_c	Tensões de fase instantânea
v_d	Tensão de eixo direto
V_{ef}	Tensão eficaz de fase
v_q	Tensão de eixo em quadratura
V_w	Velocidade do vento
V_ϕ	Tensão terminal de saída
X_s	Reatância de estator
ω	Velocidade angular
J	Momento de inércia

I_m	Corrente de magnetização
I_C	Corrente capacitiva
L_m	Indutância de magnetização
C	Capacitância
i_q	Corrente de eixo direto
X_C	Reatância capacitiva
s	Escorregamento
R_1	Resistência do estator
X_1	Reatância do estator
R_r	Resistências do rotor refletida para o estator
X_2	Reatância de dispersão do rotor
X_m	Reatância de magnetização do entreferro
R_m	Resistência para perdas no núcleo e por atrito
V_s	Tensão terminal por fase
f_{sm}	Velocidade mecânica do campo magnético em rpm
f_{se}	Frequência elétrica das correntes de estator
V_g	Tensão de entreferro
F	Frequência por unidade
f_1	Frequência de saída da máquina 1
f_2	Frequência de saída da máquina 2
f_s	Frequência de escorregamento
K_1, K_2 e K_3	Constantes
p_1	Número de polos da máquina 1
p_2	Número de polos da máquina 2
R_{LP}	Resistência de carga em paralelo
X_{LP}	Reatância indutiva em paralelo
X_P	Reatância de carga em paralelo
ρ	Densidade do ar
β	Ângulo de inclinação da hélice da turbina
ω_m	Velocidade angular mecânica
λ	Relação de velocidade linear
τ_{ind}	Conjugado induzido
ω_e	Velocidade angular elétrica

ω_r	Velocidade angular do rotor
ω_s	Velocidade angular síncrona
λ_d	Fluxo concatenado de eixo direto
λ_q	Fluxo concatenado de eixo em quadratura
ω_{se}	Frequência elétrica das correntes de estator
ω_{sm}	Velocidade mecânica do campo magnético do estator
θ_{se}	Ângulo elétrico
θ_{sm}	Ângulo mecânico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	20
1.2	JUSTIFICATIVA	22
1.3	OBJETIVOS DESTA DISSERTAÇÃO.....	22
1.3.1	Objetivo Geral	22
1.3.2	Objetivos Específicos	22
1.4	ORGANIZAÇÃO DESTA DISSERTAÇÃO.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	UTILIZAÇÃO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS SINCRONIZADAS MECANICAMENTE	25
2.2	GERADORES ACOPLADOS A FONTES PRIMÁRIAS.....	29
2.2.1	Geradores síncronos	30
2.2.2	Geradores PMSG	33
2.2.3	Geradores de indução do tipo gaiola de esquilo	36
2.2.4	Geradores de indução com rotor bobinado	41
2.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	43
3	MULTIPLICAÇÃO DA FREQUÊNCIA UTILIZANDO MÁQUINAS SINCRONIZADAS MECANICAMENTE	44
3.1	DUPLICAÇÃO DE FREQUÊNCIA COM RELAÇÃO AOS CAMPOS MAGNÉTICOS GIRANTES.....	46
3.2	MULTIPLICAÇÃO DE FREQUÊNCIA NA CARGA	50
3.2.1	Multiplicação de frequência com geradores sincronizados mecanicamente	51
3.2.2	Máquina de indução para multiplicação de frequência	55
3.3	GERADORES PARA DIFERENTES TIPOS DE CARGAS	55
3.3.1	Operação Isolada De Geradores Sincronizados Mecanicamente	55
3.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	62
4	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA MÁQUINAS SINCRONIZADAS MECANICAMENTE	63
4.1.1	Simulação com gerador PMSG	64
4.1.2	Simulação com gerador de indução	67
4.1.3	Simulação com gerador síncrono	70
4.2	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA DIFERENTES NÚMEROS DE POLOS	73
4.2.1	Combinações de geradores com 2x4 polos	75
4.2.2	Combinações de geradores com 4x4 polos	76
4.2.3	Combinações de geradores com 6x4 polos	76
4.2.4	Combinações de geradores com 8x4 polos	76
4.3	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA DIFERENTES CARGAS.....	78
4.3.1	Resultados de simulação para carga resistiva trifásica	79
4.3.2	Resultados de simulação para carga indutiva	80
4.3.3	Resultados de simulação para carga capacitiva	82
4.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	83
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA MÁQUINAS SINCRONIZADAS MECANICAMENTE	84
5.1	DUPLICAÇÃO DE FREQUÊNCIA NA CARGA	84
5.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA GERADORES COM DIFERENTES NÚMEROS DE POLOS	87
5.2.1	Resultados experimentais para os geradores com 2x4 polos	88

5.2.2	Resultados experimentais para os geradores com 4x4 polos	88
5.2.3	Resultado experimental dos geradores com 6x8 polos	88
5.2.4	Resultado experimental dos geradores com 8x4 polos	90
5.3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA DIFERENTES CARGAS	91
5.3.1	Resultados experimentais para carga resistiva trifásica.....	91
5.3.2	Resultados experimentais para carga indutiva.....	93
5.3.3	Resultados experimentais para carga capacitiva.....	95
5.4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM GERADORES CONECTADOS A REDE DA CONCESSIONÁRIA	97
5.4.1	Execução do experimento	98
5.4.2	Análise da distribuição de potência	100
5.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	103
6	CONCLUSÕES.....	105
6.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	106
6.2	PUBLICAÇÕES.....	107
	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICE A — FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E NÃO RENOVÁVEIS NO PANORAMA ENERGÉTICO.....	111
	APÊNDICE B — GERAÇÃO EÓLICA DE ENERGIA ELÉTRICA	116
	APÊNDICE C — CÁLCULO DOS CAPACITORES PARA SIMULAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO	119
	APÊNDICE D — DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA OS MOTORES DE INDUÇÃO	120

1 INTRODUÇÃO

Na sociedade atual, a geração de energia elétrica não apenas oferece conforto e conveniências aos usuários, mas também é um produto indispensável na indústria e no comércio. Como resultado, a eletricidade tem sido indispensável para gerar renda, produtividade e fortalecer a economia.

No Brasil, como em muitos outros países, os sistemas de geração de energia elétrica concentram-se em usinas alimentadas por diversas fontes primárias (hidrelétricas, termoelétricas, nucleares, etc.) e direcionadas aos centros de consumo por linhas de transmissão e distribuição. Entretanto, os meios de geração e as diretrizes a eles relacionadas vêm evoluindo em todo o mundo e observa-se que esse cenário começa a sofrer profundas modificações, tais como, uma maior diversidade das fontes geradoras com descentralização da geração e inserção de fontes renováveis e sustentáveis. A evolução destes processos, associada ao conceito de Redes Elétricas Inteligentes (REI), permite o surgimento dos modernos sistemas elétricos, com menor impacto ambiental, maior maleabilidade, altos índices de auto geração, maior confiabilidade, segurança e operabilidade (REIS, 2011).

A maioria das usinas atuais de energia existentes no mundo é baseada em combustíveis fósseis. Com o aquecimento global, devido aos altos níveis de emissões de gases prejudiciais à saúde e à atmosfera, estudos apontam para uma possível exaustão dessas matrizes em algo em torno de cem anos. Essa perspectiva leva os líderes das nações a aprovar políticas destinadas a substituir gradualmente as fontes geradoras de energia não renovável e poluidoras por outras mais sintonizadas com a atual concepção (GWEC, 2019).

A Geração com fontes alternativas, e primordialmente renováveis, está crescendo em novos sistemas de geração de energia elétrica. Entre estas alternativas geradoras estão as energias eólica, fotovoltaica, biomassa, pequenas usinas hidrelétricas e células de combustível. Mais detalhes das fontes renováveis e não renováveis de energia podem ser consultados no apêndice A.

Entre as alternativas limpas para geração de energia elétrica usando máquinas rotativas estão a energia eólica e a hidráulica. Destas fontes renováveis de energia, a eólica figura como uma das que mais poderá competir com as fontes convencionais de energia (ZHANG et al., 2017).

A inserção de fontes renováveis na geração distribuída vem causando importantes mudanças no setor elétrico, uma vez que seus custos estão próximos ou inferiores às fontes

fósseis, principalmente a geração fotovoltaica que ganha espaço entre os consumidores comerciais e residenciais, descentralizando o sistema elétrico.

As fontes renováveis vêm se tornando uma solução mais barata para geração de energia elétrica, além de contribuir para a descarbonização do ambiente. As mudanças climáticas globais devidas a emissão de CO₂ estão atualmente em níveis alarmantes. Deste modo, descarbonizar o setor elétrico é uma necessidade urgente. O movimento de descarbonização em escala global tem sido um dos principais motivos para o desenvolvimento das fontes renováveis com o impulso do Acordo de Paris de 2015 (INERGIAL, 2020).

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Os rotores dos geradores eólicos operam comumente para velocidades de vento na ordem de 10 a 30 m/s, independentemente de seu diâmetro. Neste caso, o vento produz velocidades baixas de rotação nos geradores elétricos variando relativamente entre 10 e 200 rpm. Tradicionalmente, a rotação necessária para os aerogeradores conectarem-se à rede de distribuição elétrica deve ser de 1.500 rpm (50 Hz) ou de 1800 rpm (60 Hz), ou ainda pode-se usar um número maior de polos. A transmissão da rotação para os geradores é feita por meio de engrenagens que multiplicam a velocidade angular do gerador para aumentar seu aproveitamento (FARRET; SIMÕES, 2017; REIS, 2011).

As usinas hidroelétricas devem gerar energia compatível com o suprimento das cargas e características que permitam sua conexão aos sistemas interligados, ou seja, com níveis de tensão e frequência bem determinados.

Uma turbina hidráulica é projetada para trabalhar com certa altura de queda da água com rotação fixa e definida e nessas condições estabelece sua potência nominal. A necessidade de rotações fixa em turbinas traz dificuldade na fase de projeto. A variação da altura de queda da água em função da variação topográfica e variações da vazão dos reservatórios são a causa da variação de frequência (REIS, 2011).

Para garantir uma frequência compatível com a rede, utiliza-se conversores CA-CA para conexão dos geradores ao barramento (REIS, 2011). Como mencionado anteriormente, para energia eólica e hidráulica, é essencial mover a turbina em velocidades compatíveis com a frequência do gerador elétrico acionado pelo fluxo de fluido em movimento (REIS, 2011). Essa taxa de fluxo é específica para todos os tipos de uso. Por exemplo, a geração hidrelétrica por

fluxo de água ou com reservatório pode ser totalmente utilizada para gerar eletricidade (FARRET, 2010). Além disso, pode ser usado para outros fins, como irrigação e navegabilidade. Ou seja, o fluxo através da turbina deve ser regulado de acordo com a finalidade de uso.

O aumento da frequência de geração traz algumas vantagens, como, a redução da relação de velocidades das caixas de engrenagens. Estas representam as maiores perdas. Por exemplo, uma caixa de engrenagens com três estágios, deve ter relações de velocidade geralmente entre 60 e 120. Entretanto, os problemas das caixas de engrenagens são:

- * altas relações de velocidade, as quais implicam em alto custo inicial,
- * intenso ruído audível,
- * desgaste acentuado das partes mecânicas da central,
- * vida útil reduzida,
- * eficiência reduzida, e
- * necessidade de manutenção regular.

Uma limitação importante para a geração de energia eólica ou hidráulica é a menor velocidade do vento ou do fluxo de água. Mas, esta pode ser compensada por multiplicadores de velocidade. As soluções atuais para esse problema, em geral são: aumento do número de polos do gerador, uso de multiplicadores mecânicos de velocidade para pequenos e médios geradores e, o uso de conversores eletrônicos de potência.

A necessidade de frequências maiores para geração de energia implica que o gerador deve operar em velocidades ainda maiores. Por outro lado, gerar uma frequência com essa característica, embora haja redução de velocidade, contribui-se para diminuir a taxa de comutação dos conversores de potência, tamanho dos filtros do conversor de potência, estresse dos componentes eletrônicos de potência, bem como ondulações de frequência suavizadas nas variações de carga e ruído.

Um aumento de frequência compatível com a rede elétrica ou a carga pode ser alcançado com a utilização de conversores de frequência. Estes dispositivos com frequências de chaveamento elevadas trazem desvantagens como: baixa durabilidade, perdas maiores, ruído e alto custo, o qual é significativamente maior que o das máquinas que os controlam. Outro aspecto é que, os conversores eletrônicos de energia poluem o fornecimento de energia com componentes harmônicos de tensão e corrente, tendo limitando a durabilidade. Soluções para estes problemas com harmônicos elevam os custos dos conversores demandando um maior investimento inicial.

1.2 JUSTIFICATIVA

Existem diversas alternativas para se gerar energia útil aproveitando o movimento de turbinas eólicas e hidráulicas. A procura de alternativas para a geração de energia elétrica é de especial interesse. Destacam-se aquelas extraídas de fontes com velocidades reduzidas do fluxo de água ou com baixas densidades de vento. Um outro aspecto é fazer com que a energia gerada seja compatível com a carga. Para isto diminui-se ou até elimina-se equipamentos intermediários como: caixas de velocidades e conversores de potência. Sempre e quando estes tornem o sistema mais complexo e caro. Nesta dissertação realizou-se uma análise com diferentes combinações de máquinas elétricas.

O princípio básico da multiplicação de frequência traz consigo a possibilidade de se evoluir para a fabricação de máquinas com bobinagem dupla e evitar em certos casos o uso de conversores eletrônicos de potência ou ainda, contribuir para uma redução drástica na demanda de parâmetros mais aprimorados destes conversores.

1.3 OBJETIVOS DESTA DISSERTAÇÃO

1.3.1 Objetivo Geral

O principal objetivo desta dissertação é apresentar a possibilidade de sincronizar mecanicamente, de forma compacta, dois geradores elétricos acionados por turbinas eólicas ou fluxo de água, visando aumentar a frequência elétrica da tensão de carga.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral desta dissertação foram desenvolvidos os seguintes itens específicos:

- Caracterizar as rotações de diversas fontes transdutoras de energia e a crescente utilização desses e em pequenas usinas de energia.
- Descrever e analisar o funcionamento dos diferentes tipos de geradores elétricos movidos por fontes primárias.

- Fazer uma breve descrição sobre a utilização de máquinas elétricas acopladas mecanicamente e a atual perspectiva na Engenharia Elétrica.
- Verificar o desempenho do sistema de geração simulando-o no ambiente PSIM®.
- Desenvolver e implementar em laboratório a configuração proposta para os geradores acoplados mecanicamente e seu comportamento frente a diferentes velocidades e tipos de carga.
- Comparar e analisar os resultados de simulação computacional com os resultados práticos obtidos no laboratório.

1.4 ORGANIZAÇÃO DESTA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira:

- No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica acerca das máquinas elétricas utilizadas na conversão de energia mecânica em energia elétrica. Inicialmente, são apresentadas algumas técnicas utilizando máquinas sincronizadas mecanicamente antes da evolução da eletrônica de potência; também são descritos os principais tipos de geradores elétricos acionados por máquinas primárias como as turbinas eólicas e hidráulicas.
- No Capítulo 3 é apresentada a teoria básica para a duplicação de frequência utilizando máquinas sincronizadas mecanicamente; além disto, faz uma referência teórica sobre a multiplicação de frequências de geradores elétricos, definindo alguns conceitos para tipos distintos de geradores de energia, porém multiplicando a frequência na carga. Ainda é feita uma abordagem teórica das máquinas alimentando uma carga.
- O Capítulo 4 apresenta a simulação com a turbina eólica disponível no PSIM e comparando os diversos tipos de geradores; também são feitas simulações, porém multiplicando a frequência na carga; ainda são realizados alguns testes com os geradores alimentando diferentes tipos de carga.

- O Capítulo 5 apresenta uma metodologia similar à do capítulo anterior mostrando a montagem prática dos geradores que devem obedecer as condições impostas nas simulações para se comprovar os resultados; descreve-se as conexões usadas em laboratório para os geradores com diferentes tipos de carga; também é analisado o comportamento dos geradores com multiplicação de frequência para a conexão com a rede de distribuição de energia levando em consideração as condições e métodos de tal experiência prática.
- No Capítulo 6 são apresentadas e discutidas as principais conclusões desta dissertação e novas ideias para o desenvolvimento de trabalhos futuros relacionados a este assunto para novas publicações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica acerca das máquinas elétricas utilizadas na conversão de energia mecânica em energia elétrica. Inicialmente, são apresentadas algumas técnicas utilizando máquinas sincronizadas mecanicamente antes da evolução da eletrônica de potência. Na sequência, são descritos os principais tipos de geradores utilizados na conversão de energia e suas características. Por fim, é feita uma breve descrição de alguns destes geradores aplicados na conversão de energia eólica e de energia hidráulica.

2.1 UTILIZAÇÃO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS SINCRONIZADAS MECANICAMENTE

Máquinas elétricas acopladas mecanicamente com engrenagens são utilizadas desde o início do século XIX, quando se havia a necessidade de variar a velocidade de funcionamento de motores elétricos. Estas operações com velocidade variável eram restritas aos motores de corrente contínua. Porém, com a transição no início do século XX dos sistemas de corrente contínua para os sistemas de corrente alternada trifásicos, o uso das máquinas de indução trifásica passou a se tornar mais comum, substituindo gradativamente as máquinas de corrente contínua em muitas aplicações (SALLES, 2009).

A operação com velocidade variável dos motores era feita com máquinas de indução com diferentes números de polos no estator ou através do conjunto motor AC/gerador CC que alimentava outro motor CC de velocidade variável. Tais configurações eram ineficientes, complexas e necessitavam de frequentes manutenções nos comutadores das máquinas CC, que muitas vezes, eram de alta potência, em torno de 4000 hp. O uso de resistência variáveis nos enrolamentos do rotor também era uma alternativa, porém para variações de velocidade bem mais baixas e limitadas.

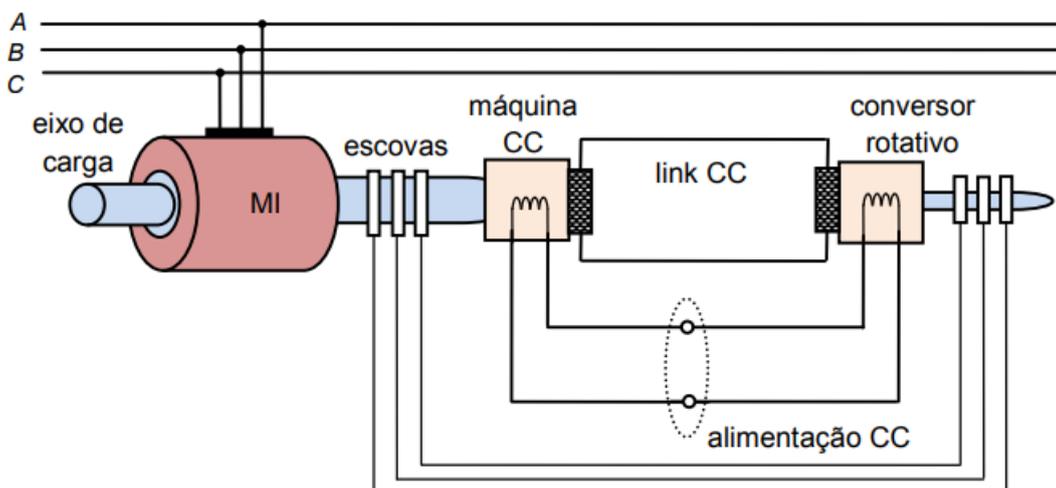
Alguns exemplos de métodos para controle de velocidade levantados na literatura são:

a) *Sistema Krämer*

Este sistema utiliza um link comum de corrente contínua interligando máquinas convencionais (uma máquina de corrente contínua e um conversor síncrono). As escovas de saída do conversor síncrono de frequência alimentam os anéis coletores dos enrolamentos

do motor de indução. A frequência do secundário do rotor bobinado é a frequência do conversor rotativo. O controle do fator de potência é feito variando a posição de fase das escovas do conversor rotativo. O aumento de velocidade é feito elevando-se a tensão aplicada, e, portanto, a potência, aos enrolamentos do rotor. Este sistema foi proposto em 1908 por C. Kramer. A Figura 2.1 apresenta a configuração básica deste sistema (SALLES, 2009).

Figura 2.1 – Controle do fator de potência e da velocidade



Fonte: (SALLES, 2009).

Sistemas similares ao apresentado na Figura 2.1, porém as máquinas não utilizando sincronismo eletromecânico, era o sistema *Scherbius* e o sistema *Clymer*.

O sistema *Scherbius*, é baseado na aplicação de tensão e frequência variáveis no rotor da máquina de indução de acordo com a velocidade desejada. A tensão e a frequência eram produzidas por uma máquina comutadora auxiliar, na qual as bobinas eram projetadas para operação trifásica (SALLES, 2009).

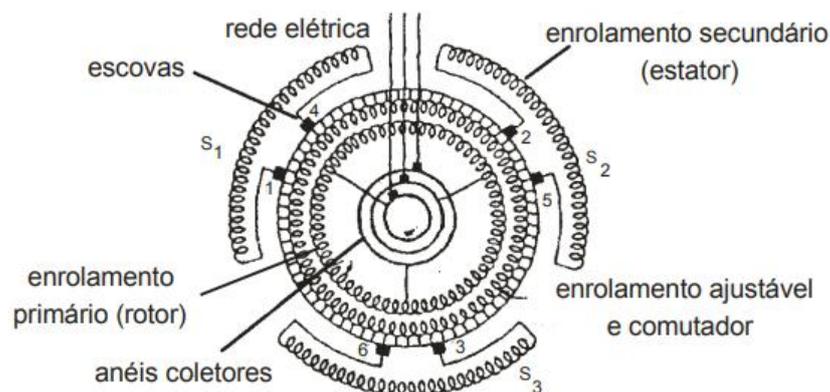
Devido a necessidade do controle de velocidade em motores de alta potência, o sistema *Clymer* surgiu na década de 40. Nesta configuração, os dois motores de indução de rotor bobinado tem seus enrolamentos rotóricos ligados em série. Porém, um motor síncrono (MS) operando a vazio é ligado também em série com os enrolamentos rotóricos entre os dois MI's

de forma a injetar tensão e frequência para controlar o fator de potência e a velocidade dos motores de indução (HESLA, 2007).

b) *Motor Schräge*

Para uma faixa de velocidades nominais mais limitadas do que a dos três sistemas descritos anteriormente, foi criado um motor que combinava uma máquina de indução de rotor bobinado com uma máquina de comutação trifásica em um só equipamento tal como proposto em 1914. Esse motor elimina a necessidade de máquinas auxiliares, tornando o sistema mais simples e mais barato. Como mostrado na Figura 2.2, o enrolamento primário é montado no rotor do motor Schräge, por meio do qual é alimentado pela rede elétrica trifásica via anéis coletores. O comutador é montado no rotor, sendo este conectado ao enrolamento ajustável convertendo a frequência da rede elétrica para a frequência desejada no enrolamento secundário estatórico. Os ajustes de velocidade e de correção do fator de potência são feitos mecanicamente variando a posição angular das escovas. Estas máquinas foram muito utilizadas na indústria (SALLES, 2009).

Figura 2.2 – Esquema dos enrolamentos do motor *Schräge*



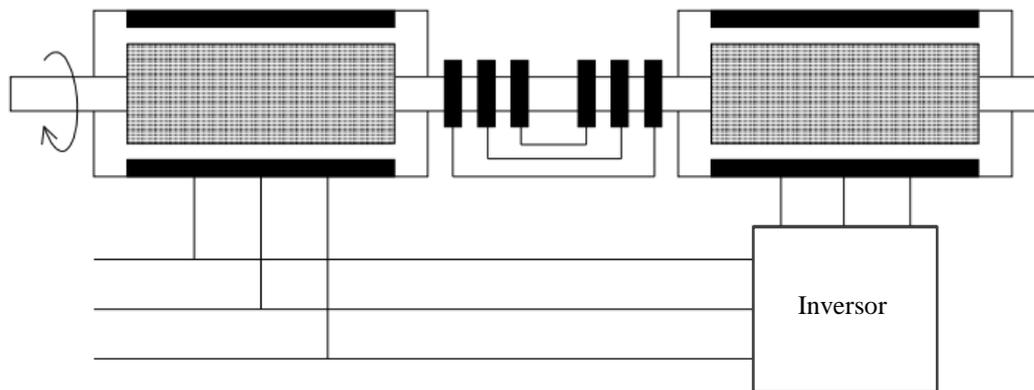
Fonte: (SALLES, 2009).

Nos aerogeradores modernos a energia elétrica produzida é geralmente manipulada por conversores eletrônicos de potência para que a energia possa ser fornecida à rede elétrica sob condições de consumo (AYAZ; COLAK; BAYINDIR, 2016). Diante disso, ao longo das últimas décadas foram desenvolvidas diversas topologias para configuração de máquinas

elétricas. Conversores de potência foram associados às diversas técnicas de controle, dentre estas, o gerador DFIG que utiliza algumas configurações com duas máquinas de rotor bobinado conectadas eletricamente através de seus rotores e mecanicamente através do rotor de acordo com a Figura 2.3.

O controle da máquina de indução que está diretamente conectada na rede é feito pela outra máquina de indução. Desta forma, alcançar o controle desacoplado de potências ativa e reativa da máquina de indução duplamente alimentada em cascata é feito de maneira semelhante à máquina de indução duplamente alimentada padrão. Este tipo de configuração é mais robusta que o modelo convencional, porém perde em eficiência (PETERSSON, 2003).

Figura 2.3 – Configuração do DFIG em cascata



Fonte: (PETERSSON, 2003).

Outra proposta que foi feita por (HAN et al., 2017) traz um método para avaliar a alta eficiência do sistema Modular Cascade Machines (MCM) que é operado como o sistema de condução em veículos elétricos (EVs). Composta por motores PMSM unitários como baterias em série que podem expandir a região de alta eficiência de forma eficaz e pode ser considerado como um sistema redundante com excelente tolerância a falhas. Este sistema multi-máquinas traz os benefícios de incluir altas densidades de torque e potência, torque pesado em baixa velocidade e alta potência em alta velocidade.

(EL ACHKAR et al., 2017) investiga as margens operacionais de energia em estado estacionário de uma máquina de indução duplamente alimentada em cascata. O principal objetivo é investigar a saturação do circuito magnético e mostrar que a capacidade de potência é determinada pelos valores máximos da corrente do estator e está sujeito a várias limitações. Semelhante ao artigo citado, (PATIN; MONMASSON; LOUIS, 2009) e (HU; ZHU;

DORRELL, 2014) trazem estudos da configuração e a análise de Cascata diferencial duplamente alimentada (DFDC) no estado estacionário, consistindo em duas máquinas de indução duplamente alimentadas com as correspondentes fases do rotor conectadas entre si. Estes conjuntos de máquinas de indução conectadas em cascata pode ser usado em automóveis elétricos ou ainda em sistemas de acionamento.

(XU et al., 2010) faz um estudo sobre máquinas sem escova alimentada duplamente, denominada por *Doubly-Fed Brushless Machine* DFBM. Este tipo de máquina é constituído por apenas uma máquina com os enrolamentos do estator conectados diretamente a rede e enrolamentos do rotor são controlados por conversor de potência. O estudo investiga a melhor combinação para o tipo de rotor e número de polos para aplicação de algoritmos de controle.

A operação entre uma máquina síncrona acoplada com um motor de indução de rotor bobinado é apresentado por (GUMEROVA; BABIKOVA; GAREEV, 2019). Este estudo descreve uma análise da operação das máquinas em cascata sob carga. O atraso de fase do campo magnético criado pela corrente no rotor bobinado do segundo estágio leva a um aumento em seu torque como em um motor síncrono convencional. O torque do conversor assíncrono, que também cresce com as correntes em seu estator e rotor, é adicionado a este momento. Os rotores de ambas as máquinas são conectados de modo a eliminar os contatos deslizantes. Esses motores podem ser usados na produção ao invés de parte de máquinas de indução em processos de operação longos ou intermitentes (pelo menos 40%) de operação, por exemplo: estações de bombeamento, sistemas de ventilação, guindastes (GUMEROVA; BABIKOVA; GAREEV, 2019).

2.2 GERADORES ACOPLADOS A FONTES PRIMÁRIAS

A construção do campo do alternador a ser utilizado em uma máquina para geração de potência elétrica dependendo essencialmente do tipo de combustível e fontes primárias de energia, conforme a disponibilidade de recursos no local geográfico a ser explorado. O número de polos e a velocidade destas máquinas estão diretamente relacionados com a frequência requerida pela rede de distribuição e/ou pela carga a ser alimentada. Para tanto, utilizam-se rotores construídos com polos salientes para máquinas primárias de baixas velocidades e com maior número de polos, neste caso se destacam as turbinas hidráulicas. Polos salientes são usados também em velocidades moderadas, com número de polos entre quatro e doze. Os tipos de fontes primárias para estes casos são motores a gasolina e óleo diesel, gás ou vapor.

Para fontes primárias com elevada velocidade são utilizados geradores constituídos com polos não salientes. Tais fontes são provenientes de turbinas a vapor ou a gás onde o vapor pode ser produzido a partir de caldeiras convencionais a carvão ou a óleo, ou de reatores atômicos. Vale destacar que estas máquinas possuem baixo número de polos (KOSOW, 1995).

A seguir é apresentada uma descrição sobre os principais tipos de geradores de potência elétrica que podem ser acoplados nas diferentes máquinas acionadoras primárias.

2.2.1 Geradores síncronos

Os geradores síncronos trifásicos constituem a principal fonte de toda a energia elétrica que consumimos. Essas máquinas são os maiores conversores de energia no mundo. Eles convertem energia mecânica em energia elétrica para potências de até alguns MW.

No caso do gerador síncrono, é produzido um campo magnético no rotor. O campo magnético do rotor pode ser produzido de duas formas, ou pelo uso de ímãs permanentes, ou por um eletroímã. Neste último, uma corrente CC é aplicada ao enrolamento do rotor. O rotor do gerador é acionado por uma fonte de energia primária ou máquina motriz primária e, como consequência, o movimento do rotor produz um campo magnético girante dentro da máquina. Assim sendo, o campo magnético girante induz um conjunto de tensões trifásicas nos enrolamentos de estator do gerador.

Considera-se que as peças polares têm um formato que produz um campo de fluxo senoidal. No estator existe um enrolamento trifásico equilibrado com o eixo de cada fase deslocado no espaço de 120° elétricos (DEL TORO, 1994).

De acordo com (FITZGERALD, 2008) tomando como referência da origem do tempo o ponto positivo máximo da onda de tensão da fase a as tensões de fase instantâneas para a geração de energia trifásica é descrita de um modo geral:

$$\begin{aligned}v_a(t) &= \sqrt{2} \cdot V_{ef} \cdot \cos \omega t \\v_b(t) &= \sqrt{2} \cdot V_{ef} \cdot \cos(\omega t - 120^\circ) \\v_c(t) &= \sqrt{2} \cdot V_{ef} \cdot \cos(\omega t + 120^\circ)\end{aligned}\tag{1}$$

Considerando que V_{ef} é a tensão eficaz em cada fase, e desta forma, as correntes trifásicas que circulam na carga deslocadas de um ângulo θ das respectivas tensões de fase serão dadas por

$$\begin{aligned}
 i_a(t) &= \sqrt{2} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\omega t + \theta) \\
 i_b(t) &= \sqrt{2} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\omega t + \theta - 120^\circ) \\
 i_c(t) &= \sqrt{2} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\omega t + \theta + 120^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

A potência instantânea em cada fase é expressa por:

$$\begin{aligned}
 p_a(t) &= v_a(t) \cdot i_a(t) = V_{ef} \cdot I_{ef} [\cos(2\omega t + \theta) + \cos \theta] \\
 p_b(t) &= v_b(t) \cdot i_b(t) = V_{ef} \cdot I_{ef} [\cos(2\omega t + \theta - 240) + \cos \theta] \\
 p_c(t) &= v_c(t) \cdot i_c(t) = V_{ef} \cdot I_{ef} [\cos(2\omega t + \theta + 240) + \cos \theta]
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

A potência instantânea de uma fase qualquer fornecida para carga é expressa pela equação (4).

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \tag{4}$$

A potência necessária para a excitação do enrolamento de campo pode atingir uma apenas uma pequena porcentagem da potência total nominal síncrona. Esta fonte de excitação CC é um sistema externo trazendo desvantagens em algumas situações pela necessidade de ter esta fonte externa. A definição *síncrona* para este tipo de máquina se deve ao fato de que a frequência elétrica da tensão gerada deva estar sincronizada com a velocidade mecânica de rotação do gerador. A frequência elétrica do estator está relacionada com a rotação dos campos magnéticos induzidos na máquina, através da equação (5) (CHAPMAN, 2013; KOSOW, 1995).

$$f_{se} = \frac{n_m \cdot p}{120} \tag{5}$$

onde:

f_{se} = frequência elétrica, em Hz;

n_m = velocidade mecânica do campo magnético, em rpm (igual a velocidade do rotor nas máquinas síncronas) em rpm;

p = número de polos.

De acordo com (CHAPMAN, 2013) o circuito equivalente de uma máquina síncrona referido a uma fase é representado na Figura 2.4.

Considerando o sentido de referência como o do gerador se define o sentido de referência de I_A e analisando o circuito equivalente da Figura 2.4, a tensão terminal de saída é expressa por:

$$V_\phi = -R_A \cdot I_A - jX_S \cdot I_A + E_A \quad (6)$$

A amplitude da tensão gerada E_A com frequência ω_e , igual à frequência elétrica da tensão de terminal do gerador. A tensão eficaz é dada pela expressão (7)

$$E_{Af} = \frac{\omega_e \cdot L_{AF} \cdot I_F}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

onde:

E_{Af} = Tensão gerada no terminal do gerador;

ω_e = Frequência elétrica da tensão gerada;

L_{Af} = Indutância de dispersão da fase a;

I_F = Corrente de campo.

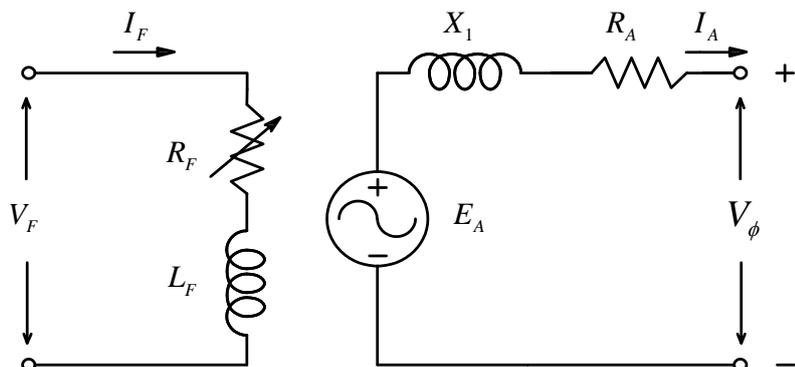
A potência elétrica ativa de saída do gerador síncrono pode ser expressa em grandezas de linha como

$$P_{saída} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \theta \quad (8)$$

A potência reativa de saída é expressa em grandezas de linha pela Equação (9)

$$Q_{saída} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \text{sen} \theta \quad (9)$$

Figura 2.4 — Representação genérica para geradores síncronos



Fonte: Adaptado de (CHAPMAN, 2013).

A expressão para o conjugado induzido em um gerador síncrono pode ser expressa como:

$$\tau_{ind} = \frac{3.V_{\phi}.E_A.\text{sen}\delta}{\omega_m.X_S} \quad (10)$$

onde:

τ_{ind} = Conjugado induzido;

E_A = Tensão gerada interna;

V_{ϕ} = Tensão gerada interna;

ω_m = Velocidade mecânica angular do rotor;

X_S = Reatância síncrona;

A equação (10) mostra que quanto maior for a corrente de campo, maior será a tensão de armadura E_A . Assim sendo, no gerador o conjugado deve ser definido pela potência ativa requisitada pela carga (CHAPMAN, 2013).

A utilização de uma excitatriz ligada aos anéis lisos através de escovas na máquina síncrona traz consigo alguns problemas referentes ao desgaste das escovas pelo atrito, causando frequentes manutenções. Por esta razão, entre outras, foi desenvolvido o gerador síncrono sem escovas (KOSOW, 1995).

Em geradores de maior porte, uma excitatriz sem escovas é obtida através de um pequeno gerador CA para a qual o circuito de campo é montado no estator e seu circuito de armadura é montado no eixo do rotor. A saída trifásica do gerador da excitatriz é transformada em corrente contínua por meio de um circuito retificador trifásico que também é montado no eixo do gerador. A corrente contínua resultante alimenta o circuito CC principal de campo (CHAPMAN, 2013).

Geradores síncronos ainda podem possuir anéis e escovas em seu eixo para o caso de emergências, deste modo uma fonte CC fica disponível para corrente de campo.

2.2.2 Geradores PMSG

Geradores de energia PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) tem construção similar aos geradores síncronos descritos anteriormente. A diferença está no rotor desta máquina que é construído com material magnético (ímãs permanentes) com a vantagem

de não perder a excitação de campo quando estão em operação, porém sua excitação não é ajustável. Algumas das vantagens e características do PMSG são descritas a seguir.

Um gerador síncrono a imã permanente (PMSG) pode ser usado diretamente na conversão de energia eólica (WECS). A estrutura PMSG geralmente possui um grande número de polos e facilita a eliminação da caixa de engrenagens. Desta forma, estes geradores apresentam uma série de vantagens com relação aos outros tipos de geradores de indução e síncronos com excitação. Entre as vantagens pode-se destacar (DEHGHANZADEH A, BEHJAT V, 2016):

- Não necessitam excitação externa;
- Não têm perdas nos circuitos de campo;
- Podem operar também em baixas velocidades;
- Dispensam caixa de engrenagens em baixas rotações;
- Têm menor custo de manutenção (sem escovas e caixas multiplicadoras).

Os geradores PMSG são os preferidos em sistemas de conversão de energia eólica de pequena escala. Vários fatores favorecem esta tendência, entre eles a sua eficiência elevada e a densidade de potência favorável contribuem para que este tipo de gerador seja cada vez mais utilizado em sistemas de pequeno porte. Isto permite que o raio das lâminas seja reduzido quando aplicado ao acionamento direto (FARRET; SIMÕES, 2017). Sua principal limitação em aplicações de elevada escala se deve ao fato do preço elevado do material magnético que compõem os imãs permanentes.

A utilização do material que constitui o rotor do gerador PMSG elimina a necessidade de excitação externa do gerador, dispensando o uso de energia reativa da rede podendo ser utilizadas pontes retificadoras a diodos na primeira fase de conversão. Com uma ponte retificadora a diodos do lado do gerador de potência eólica, várias topologias de conversores podem ser empregadas do lado da rede. Independente das topologias utilizadas existe um barramento CC cujo sinal é convertido em sinal CA com amplitude e frequência compatíveis com a carga ou a rede (YARAMASU et al., 2015).

Os geradores síncronos de imãs permanentes são chamados PMSG por que usam imãs permanentes instalados no rotor para gerar o fluxo magnético e operar em velocidade síncrona (WILDI, 2014). Estas máquinas são classificadas em função da direção do fluxo magnético em relação ao seu eixo, radial (convencional), axial e transversal.

O estator do PMSG possui uma distribuição senoidal de tensão similar ao da máquina de indução. O conjunto a imãs permanentes é montado internamente na superfície laminada do rotor com simetria radial bidimensional (FARRET; SIMÕES, 2017).

Os geradores síncronos de imãs permanentes possuem fluxo magnético radial em relação ao seu eixo de rotação, sendo o eixo direto definido por ser coincidente com o eixo magnético do campo de excitação do rotor e o eixo em quadratura formando um ângulo de 90° em relação ao eixo direto (ALTINO, 1984). Um circuito equivalente é proposto por (FARRET; SIMÕES, 2017) é mostrado na Figura 2.5 com relação às coordenadas de eixo direto e em quadratura para o gerador PMSG.

De acordo com (BRIHMAT; MEKHTOUB, 2014) o modelo de dinâmica elétrica correspondente à tensão e corrente em relação as coordenadas d-q são dados pelas equações (11) e (12).

$$v_q = -(R + \rho \cdot L_q)i_q - \omega_r \cdot L_d \cdot i_d + \omega_r \cdot \lambda_m \quad (11)$$

$$v_d = -(R + \rho \cdot L_d)i_d - \omega_r \cdot L_q \cdot i_q \quad (12)$$

onde:

R = Resistência do enrolamento de fase do estator;

L_d = Indutância do estator no eixo da quadratura;

L_q = Indutância do estator no eixo direto;

ω_r = Velocidade angular do rotor do gerador;

λ_m = Amplitude das ligações de fluxo estabelecidas por um imã permanente, visto a partir dos enrolamentos de fase do estator;

ρ = Operador d/dt .

O torque elétrico (T_e) é dado pela equação (13)

$$T_e - T_m = \left(\frac{2}{P} \right) \frac{d \cdot \omega_r}{dt} \quad (13)$$

ou também, pela equação (14)

$$T_e = \left(\frac{3}{2} \right) \cdot \left(\frac{p}{2} \right) \left[\lambda_d \cdot i_d - \lambda_q \cdot i_q \right] \quad (14)$$

onde

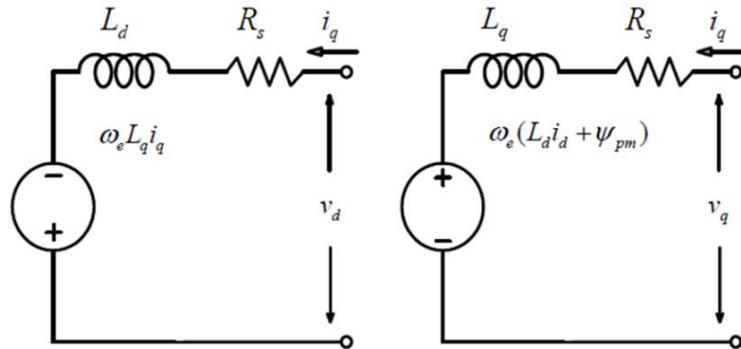
p é o número de pares de polos do PMSG;

T_e é o torque elétrico do gerador.

A relação entre a frequência angular do estator (ω_r) e a velocidade mecânica angular do rotor (ω_m) é expressa pela equação (15).

$$\omega_r = P \cdot (\omega_m) \quad (15)$$

Figura 2.5 — Circuito equivalente por fase de um gerador PMSG



Fonte: Adaptado de (FARRET; SIMÕES, 2017).

Vários tipos de configuração são encontrados na literatura para os geradores PMSG e classificados de acordo com a direção de seu fluxo, que pode ser radial (PMSG) e de fluxo transversal (TFG). No modelo com fluxo radial, o estator possui distribuição senoidal semelhante ao da máquina de indução. O conjunto de ímãs permanentes é montado na superfície laminada do rotor e com simetria radial bidirecional (FARRET; SIMÕES, 2017).

Os geradores PMSG podem ser ainda classificados de acordo com o tipo de montagem dos ímãs permanentes (IP) no rotor e a f.e.m. induzida. A montagem dos (IP) pode ser na superfície ou juntamente com o rotor da referida máquina, ou seja, com rotor interno (estator externo) ou rotor externo (estator interno). Para um dado torque, a área do espaço de ar continua sendo a mesma em ambos os casos. No entanto, do ponto de vista do projeto, é preferível um rotor externo, pois o diâmetro externo da máquina se torna menor. Isso resulta em uma melhor utilização do volume disponível (FARRET; SIMÕES, 2017; TAN; ISLAM, 2004).

2.2.3 Geradores de indução do tipo gaiola de esquilo

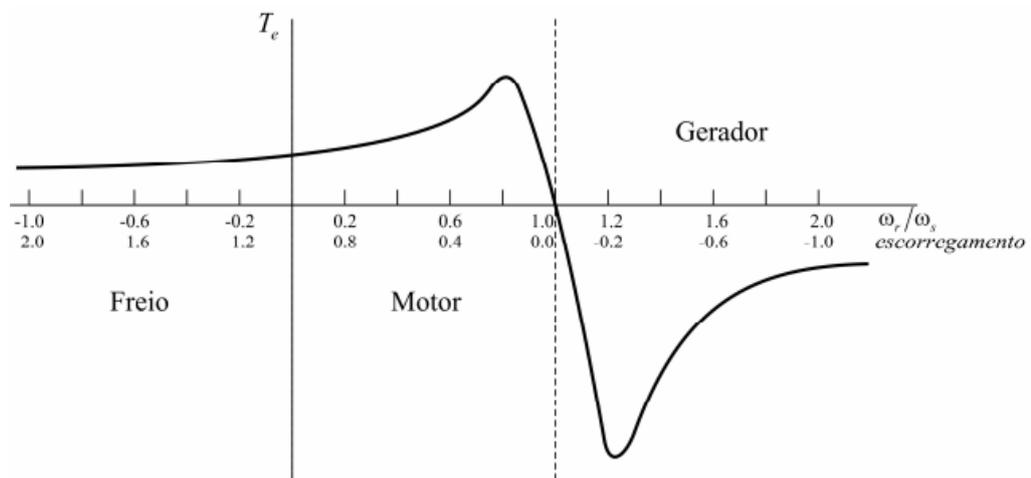
Uma máquina de indução trifásica (MIT) pode gerar eletricidade quando seu eixo é acionado por uma máquina motriz com velocidade superior a velocidade síncrona. Quando o sentido do seu conjugado induzido é invertido fazendo a máquina funcionar como gerador, os

terminais do estator recebem energia de magnetização da própria rede externa. Esta operação pode ser observada pelas características de sua curva de conjugado versus velocidade (CHAPMAN, 2013).

Na operação como motor onde ($s < 1$), o sentido de rotação do rotor (ω_r) é igual ao do campo girante (ω_s). O torque elétrico (T_e) é positivo e a máquina recebe potência elétrica. Na operação como gerador ($s < 0$), quando, o campo girante e o rotor deslocam-se no mesmo sentido, a velocidade do rotor (ω_r) é maior que a velocidade síncrona, gerando um escorregamento negativo. Neste modo, o torque elétrico (T_e) é negativo, oposto ao sentido da velocidade síncrona. A máquina recebe potência mecânica e entrega potência elétrica para o sistema pela própria conexão do estator (BIM, 2018).

Para operar como freio onde ($s > 1$), o campo magnético gira em sentido oposto ao do rotor, o escorregamento torna-se maior do que 1 e é desenvolvido um conjugado (T_e) positivo, sendo que a máquina desenvolve um conjugado no sentido contrário ao da rotação, mesmo recebendo potência elétrica (KRAUSE; WASYNCZUK; SUDHOFF, 1986). A Figura 2.6 mostra os modos de operação de uma máquina de indução em função do escorregamento s .

Figura 2.6 — Modos de operação da máquina de indução



Fonte: (KRAUSE; WASYNCZUK; SUDHOFF, 1986).

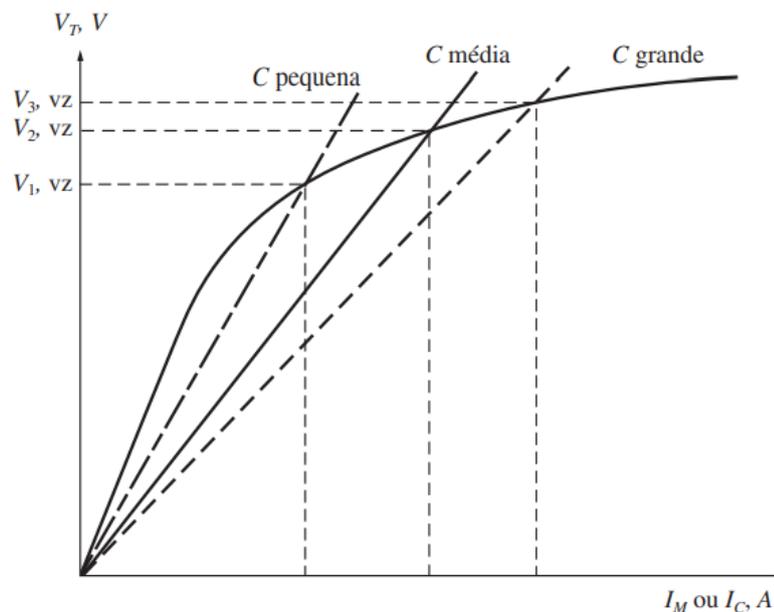
De acordo com a literatura, a principal vantagem da MI é sua simplicidade. O gerador de indução (GI) não necessita de circuito de campo separado, aceita cargas constantes e variáveis, é iniciado com ou sem carga, é capaz de operação contínua ou intermitente e possui proteção natural contra curto-circuito e sobre correntes em seus terminais. Ou seja, quando a

corrente de carga ultrapassa certos limites, o magnetismo residual cai para zero e a máquina perde sua excitação (SIMÕES; FARRET, 2015).

Para funcionar de modo isolado ou auto-excitado o GI necessita de uma fonte de reativos conectado em seus terminais. Tal fonte de reativos pode ser a partir de capacitores para fornecer a potência reativa necessária pelo gerador e pela carga.

No funcionamento auto excitado, a tensão e a frequência geradas são dependentes da capacitância, velocidade do eixo e da carga. A partir das curvas de magnetização da MIT é feito os cálculos dos capacitores. Na operação a vazio, a tensão nos terminais do gerador é determinada pela potência reativa fornecida pelos capacitores conectados aos terminais da máquina, conforme mostra a Figura 2.7 (CHAPMAN, 2013; SIMÕES; FARRET, 2015).

Figura 2.7 – Tensão terminal do gerador em função da corrente no capacitor



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Observando a Figura 2.7, nota-se que a tensão terminal no gerador pode ser obtida plotando-se a característica de tensão versus corrente do capacitor no mesmo gráfico. A intersecção das duas curvas é o ponto quando a potência reativa requerida pelo gerador é suprida pelos capacitores. Esse ponto fornece a tensão de terminal a vazio do gerador (CHAPMAN, 2013).

Levantando a curva de magnetização da máquina através dos valores da tensão em função da corrente de magnetização é possível encontrar a indutância de magnetização expressa pela equação (16) (BIM, 2018):

$$L_m = \frac{V_n / \sqrt{3}}{\omega_1 \cdot I_L} \quad (16)$$

onde:

L_m = Indutância de magnetização;

V_n = Tensão terminal;

ω_1 = Frequência de estator;

I_L = Corrente de linha.

Como o gerador está a vazio, a frequência do estator é 60 Hz e o escorregamento é praticamente nulo. Com os capacitores conectados em delta, a reatância entre terminais X_c para a conexão estrela é $X_{cY} = X_c/3$ (BIM, 2018). Logo, a partir daí se encontra a reatância capacitiva que é dada pela expressão (17)

$$X_{cY} = \frac{1}{\omega_1 \cdot L_m} \quad (17)$$

A partir desta condição obtém-se a capacitância por

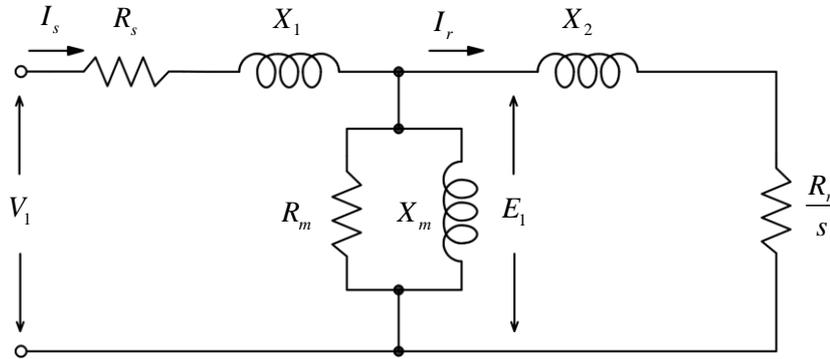
$$C = \frac{1}{3 \cdot \omega_1^2 \cdot L_m} \quad (18)$$

O circuito equivalente já simplificado e relacionado aos parâmetros de um gerador de indução com rotor gaiola de esquilo considerando uma única fase e um único par de enrolamentos para sua análise em regime permanente, representado na Figura 2.8.

A definição do escorregamento s do gerador de indução é dado pela relação entre a velocidade elétrica do estator (ω_s), ou a frequência síncrona da rede, e a velocidade angular rotórica (ω_r) expressa por (19) (FITZGERALD, 2008):

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (19)$$

Figura 2.8 — Circuito equivalente por fase de um gerador de indução



Fone: Adaptado de (FARRET; SIMÕES, 2017).

onde:

R_s = Resistência do estator;

X_l = Reatância do estator;

R_r = Resistências do rotor refletida para o estator;

X_2 = Reatância de dispersão do rotor;

X_m = Reatância que representa o efeito da magnetização da máquina;

R_m = Resistência para perdas no núcleo e por atrito;

V_s = Tensão terminal por fase.

De acordo com (SIMÕES; FARRET, 2015), o balanço de potência em uma máquina de indução ou em qualquer máquina pode ser expresso como segue:

$$P_{out} = P_{in} - P_{perdas} \quad (20)$$

Para as três tensões e correntes equilibradas, cada uma delas defasada em 120° a potência de saída, $P_{saída}$, é expressa em valores de linha como segue:

$$P_{saída} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cos \phi \quad (21)$$

A Equação (22) expressa a potência mecânica convertida em eletricidade para um escorregamento negativo s , e é dada pela diferença entre a potência de entreferro menos a potência dissipada no rotor (SIMÕES; FARRET, 2015).

$$P_{convertida} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} - 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (22)$$

onde:

I_2 = Corrente de rotor;

R_2 = Resistência do rotor refletida ao estator.

O modelo detalhado do gerador de indução, bem como a descrição matemática do processo de auto excitação podem ser consultados em (SIMÕES; FARRET, 2015).

2.2.4 Geradores de indução com rotor bobinado

As máquinas de indução trifásicas com rotor bobinado podem operar como motores ou como geradores. Para isto, elas possuem um estator com um enrolamento trifásico conectado à fonte de energia e um rotor que é igualmente bobinado, podendo ser conectado em Y ou estrela. Os terminais restantes ou início das fases levam a três anéis em que deslizam escovas elétricas de grafite que levam energia ao circuito formado por uma associação de resistores externos. Ainda pode ser instalado um quarto anel para o deslizamento de escovas o qual é conectado aos terminais centrais do enrolamento do rotor (SIMONE, 2000).

Diferente das máquinas de indução que possuem um rotor em curto-circuito para poder influenciar no circuito do rotor, a máquina de indução com rotor bobinado deve ser equipada com anéis coletores no rotor. Para levar em consideração o rotor bobinado com anéis coletores é necessário usar o circuito equivalente com a tensão aplicada do rotor de fase V_r conforme mostra a Figura 2.9 (PETERSSON, 2003).

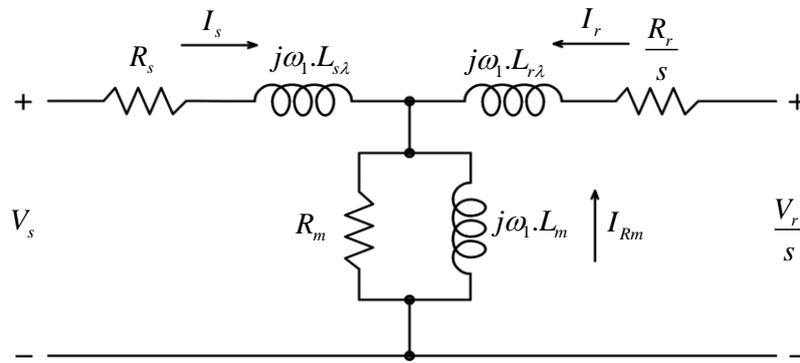
A aplicação da lei de tensão de Kirchhoff ao circuito da Figura 2.9 gera (PETERSSON, 2003) o seguinte conjunto de equações:

$$V_s = R_s \cdot I_s + j\omega_1 \cdot L_{s\lambda} \cdot I_s + j\omega_1 \cdot L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \quad (23)$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} + j\omega_1 \cdot L_{r\lambda} \cdot I_r + j\omega_1 \cdot L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \quad (24)$$

$$0 = R_m \cdot I_m + j\omega_1 \cdot L_m (I_s + I_r + I_{Rm}) \quad (25)$$

Figura 2.9 — Representação do circuito equivalente com a inclusão de uma tensão externa do rotor



Fonte: Adaptado de (PETERSSON, 2003).

onde

I_{Rm} = corrente através de R_m ;

ω_1 = Frequência síncrona;

V_s = Tensão de fase aplicado ao estator;

V_r = Tensão de fase aplicado ao rotor;

R_m = Perdas de magnetização;

A potência mecânica, P_{mec} , e as perdas, P_{perdas} , da máquina de indução podem ser obtidas como segue:

$$P_{mec} = 3|I_r|^2 R_r \frac{1-s}{s} - 3 \operatorname{Re} [V_r I_r^*] \frac{1-s}{s} \quad (26)$$

$$P_{perdas} = 3 R_s |I_s|^2 + 3 R_r |I_r|^2 + 3 R_m |I_{Rm}|^2 \quad (27)$$

onde a multiplicação por 3 se deve ao fato de as máquinas de indução terem três fases. O torque eletromecânico (T_e), pode ser encontrado na equação (28).

$$T_e = P_{mec} \frac{n_p}{(1-s)\omega_1} = 3|I_r|^2 R_r \frac{n_p}{s \cdot \omega_1} - 3 \operatorname{Re} [V_r I_r^*] \frac{n_p}{s \cdot \omega_1} \quad (28)$$

onde n_p é o número de pares de polos.

As equações anteriores demonstram que a potência mecânica e o torque mecânico são dados em função do escorregamento, a corrente do rotor e a resistência do rotor.

No caso dos motores de indução com rotor bobinado pode-se alterar a forma da curva de velocidade versus torque através da inserção de resistências externas no circuito do rotor da máquina. Esta característica tem bastante linearidade com sua velocidade síncrona. O torque é proporcional ao inverso da resistência do rotor. As resistências podem ser conectadas em série com a resistência do rotor e ter o controle de velocidade da máquina. Se a máquina estiver trabalhando como gerador e se for aumentada a resistência do rotor, a velocidade deste rotor também vai aumentar, trazendo uma desvantagem para esse método (PETERSSON, 2003). Estes motores tem um custo maior que os motores de indução com gaiola de esquilo. Eles precisam de maior manutenção devido ao desgaste em suas escovas e anéis deslizantes. Diante disso, os motores de indução de enrolamento bobinado dificilmente são usados (CHAPMAN, 2013). Tais características trazem benefícios e motivos para utilizar estas máquinas como geradores em sistemas de energia eólica, principalmente, onde a velocidade do vento é baixa, e a curva de atuação como gerador é maior que dos motores de indução do tipo gaiola. Por estes motivos, os motores de indução com rotor bobinado estão ressurgindo como uma boa alternativa na geração de energia elétrica.

2.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica acerca das máquinas elétricas utilizadas na conversão de energia mecânica em energia elétrica. Inicialmente, são apresentadas algumas técnicas utilizando máquinas sincronizadas mecanicamente antes da evolução da eletrônica de potência. Ainda foram abordados os principais tipos de geradores utilizados na conversão de energia eólica e de energia hidráulica, descrição de funcionamento, vantagens e desvantagens.

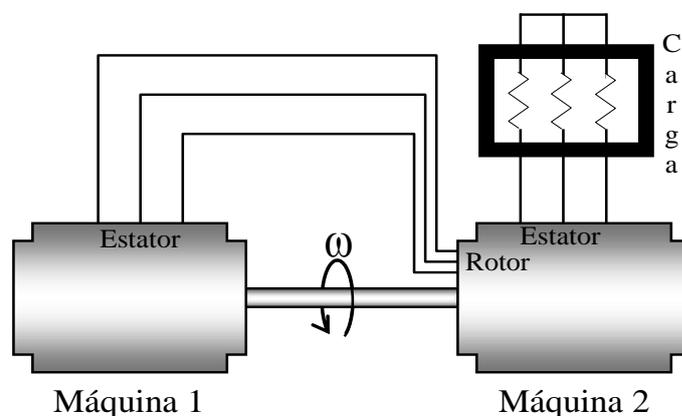
O próximo capítulo visa apresentar a interação entre dois geradores acoplados mecanicamente em oposição de rotação. Salienta-se geração de energia a partir desta técnica utilizando diferentes tipos de máquinas elétricas.

3 MULTIPLICAÇÃO DA FREQUÊNCIA UTILIZANDO MÁQUINAS SINCRONIZADAS MECANICAMENTE

Para explorar o potencial oferecido por duas máquinas sincronizadas mecânica e eletricamente esta dissertação mostra inicialmente no Capítulo 2 um método de duplicação da frequência de carga nos terminais de um gerador (máquina 2) em relação à frequência básica do rotor obtida a partir dos terminais do estator de uma máquina geradora de energia (máquina 1); ou também chamada de excitatriz. A potência de saída é aplicada à carga nos terminais de saída. Esta técnica usa um eixo comum aos dois geradores, porém conectando as fases elétricas em oposição s (PMSG, MI, MS). O acionamento das máquinas sincronizadas mecanicamente é feito a partir de uma fonte primária rotativa qualquer. Por exemplo, o fluxo de vento ou água usados para impor uma velocidade sincronizada mecanicamente aos dois geradores através de um eixo comum.

A potência elétrica e o torque de máquinas elétricas podem ser obtidos, a partir da potência mecânica. O aumento da frequência gerada eletricamente tanto pelo fluxo do vento quanto da água pode ser obtido eletronicamente ou mecanicamente (WANG et al., 2014). A Figura 3.1 mostra uma configuração de duas máquinas sincronizadas mecanicamente por um eixo comum como proposto nesta dissertação como uma maneira de se obter uma outra frequência para a tensão a ser aplicada na carga de uma máquina ou carga elétrica.

Figura 3.1 — Duas máquinas sincronizadas mecanicamente por um eixo comum em oposição de rotação



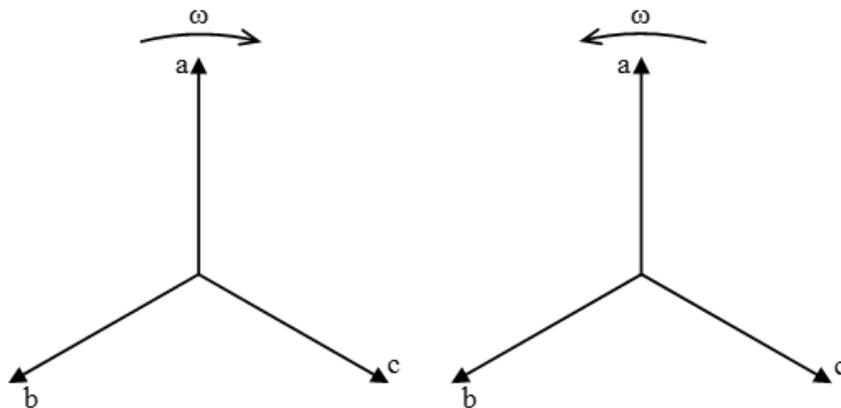
Uma representação vetorial trifásica da técnica de sincronização mecânica é mostrada na Figura 3.2. As fases elétricas têm uma frequência duplicada mecanicamente / eletricamente em relação à frequência fundamental que gira em oposição de fase. Isso fornece uma soma relativa das velocidades do eixo de geração em cada fase. Neste exemplo esquemático de sincronização mecânica, as máquinas elétricas podem ser distinguidas como, por exemplo, uma máquina de indução (MI) com rotor de enrolamento e uma máquina síncrona (MS). Ambas as máquinas devem ser acionadas por um eixo comum, mas acopladas de forma que tenham as velocidades dos campos magnéticos em oposição. A potência de saída da transmissão P_t é dada pelo produto da potência de saída da turbina P_m e pela eficiência da transmissão η_m (JOHNSON, 2006):

$$P_t = \eta_m \cdot P_m \quad (29)$$

Não há possibilidade de instabilidade no sistema de multiplicação de frequência aqui proposto usando duas máquinas, por exemplo usando um *Wound Rotor Induction Machine* (WRIMs), pois a máquina síncrona e o acionamento pela turbina eólica são mecanicamente sincronizadas. Obviamente, como qualquer outro sistema elétrico, sempre é necessário evitar-se os efeitos da ressonância ou antirressonância com a carga. A potência de saída do gerador é fornecida pelo produto da potência de saída da transmissão e pela eficiência do gerador. Como existe um eixo comum, não há perdas diretas nesta conversão de energia. Então (JOHNSON, 2006):

$$P_e = \eta_g \cdot P_t \quad (30)$$

Figura 3.2 — Oposição de fases dos geradores elétricos



Fonte: Autor.

As equações (29), (30) e (31) podem ser condensadas em uma única equação que relaciona a saída de energia elétrica à entrada de energia eólica:

$$P_e = C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot P_w \quad (31)$$

Na velocidade nominal do vento, a potência nominal de saída elétrica pode ser expressa por (32) como:

$$P_{ew} = C_{pw} \cdot \eta_{mw} \cdot \eta_{gw} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot V_w^3 \quad (32)$$

onde:

P_{ew} = Potência elétrica nominal de saída na velocidade nominal do vento;

η_{mw} e η_{gw} são respectivamente as eficiências de transmissão e gerador na potência nominal;

A = Área varrida pelas hélices das turbinas em (m²);

ρ = é a densidade do ar (kg/m³).

A quantidade $\eta_o = C_{pw} \cdot \eta_{mw} \cdot \eta_{gw}$ é a eficiência geral nominal da turbina (JOHNSON, 2006). Mais detalhes sobre a geração eólica de energia elétrica podem ser consultados no apêndice B.

3.1 DUPLICAÇÃO DE FREQUÊNCIA COM RELAÇÃO A DOS CAMPOS MAGNÉTICOS GIRANTES

O princípio de funcionamento de uma máquina CA é que se as correntes trifásicas estiverem defasadas de 120° entre si e com uma mesma intensidade num enrolamento trifásico, um campo magnético girante de intensidade constante será produzido. O enrolamento trifásico é formado por três enrolamentos espaçados de 120 graus elétricos entre si e ao redor da superfície de giro da máquina. (CHAPMAN, 2013). Os polos magnéticos assim formados dão uma volta mecânica completa ao redor do estator para cada ciclo elétrico da corrente aplicada. Portanto, a velocidade mecânica de rotação do campo magnético, em rotações por segundo, é igual à frequência elétrica em Hz:

$$f_{se} = f_{sm} \quad \text{para dois polos} \quad (33)$$

$$\omega_{se} = \omega_{sm} \quad \text{para dois polos} \quad (34)$$

onde

f_{sm} e ω_{sm} representam a velocidade mecânica dos campos magnéticos do estator em rotações (ou revoluções) por segundo e em radianos por segundo f_{se} e ω_{se} são a frequência elétrica das correntes do estator em hertz e em radianos por segundo (CHAPMAN, 2013).

Quando dois polos (norte) e dois polos (sul) são produzidos no enrolamento do estator, a cada ciclo elétrico, um polo desloca-se apenas metade do percurso circular ao longo da superfície do estator. Como um ciclo elétrico tem 360 graus e como o deslocamento mecânico é de 180 graus mecânicos, a relação entre o ângulo elétrico θ_{se} e o ângulo mecânico θ_{sm} neste estator é expresso por (35)

$$\theta_{se} = 2.\theta_{sm} \quad (35)$$

Desta forma, em um enrolamento de quatro polos, a frequência elétrica da corrente é o dobro da frequência mecânica de rotação:

$$f_{se} = 2.f_{sm} \quad \text{para dois polos} \quad (36)$$

$$\omega_{se} = 2.\omega_{sm} \quad \text{para quatro polos} \quad (37)$$

De um modo geral, se o número de polos de estator de uma máquina CA for p , haverá $p/2$ repetições para cada sequência de fases a-b-c, sobre a superfície interna. As grandezas elétricas e mecânicas podem ser relacionadas conforme as equações (38), (39) e (40) a seguir:

$$\theta_{se} = \frac{P}{2}.\theta_{sm} \quad (38)$$

$$f_{se} = \frac{P}{2}.f_{sm} \quad (39)$$

$$\omega_{se} = \frac{P}{2}.\omega_{sm} \quad (40)$$

Com a expressão $f_{sm} = n_{sm}/60$ pode-se estabelecer uma relação entre a frequência elétrica do estator em hertz e a velocidade mecânica resultante dos campos magnéticos em rotações (revoluções) por minuto. Essa relação é dada por (41):

$$f_{se} = \frac{n_{sm} \cdot P}{120} \quad (41)$$

A tensão gerada na bobina de uma máquina multipolar completa um ciclo sempre que um par de polos passar na frente de cada bobina ou $(p/2)$ vezes em cada revolução (KOSOW, 1995). Portanto, a frequência elétrica é dada por:

$$f_e = \left(\frac{P}{2}\right) \cdot \frac{n_s}{60} \text{ Hz} \quad (42)$$

onde:

f_e = frequência em Hz;

p = número de polos;

n_s = velocidade síncrona do eixo em rpm.

Da mesma forma, a velocidade angular mecânica ω_m está relacionada à velocidade síncrona angular ω_{sinc} e ao fator de escorregamento, respectivamente como (CHAPMAN, 2013):

$$\omega_m = (1-s) \cdot \omega_{sinc} \quad (43)$$

A velocidade do rotor em rpm pode ser expressa em termos de escorregamento síncrono s da velocidade como (CHAPMAN, 2013):

$$n_m = (1-s) \cdot n_{sinc} \quad (44)$$

A relação de movimento entre o fluxo magnético do estator e a frequência elétrica f_e e os condutores do rotor com fator de escorregamento s geram tensões com frequência f_r (FITZGERALD, 2008).

$$f_r = s \cdot f_e \quad (45)$$

Quando o escorregamento é maior que 1, a conversão mecânica de frequência ocorre porque o rotor gira no sentido anti-horário. Assim, apenas o sinal positivo é considerado e o

escorregamento é igual a 180° entre o rotor e o estator o valor é 2. De acordo com a frequência de conversão pode ser calculada por (50) (KOSOW, 1995):

$$f_{conv} = f_{sinc} \cdot \left[1 \pm \frac{n_{conv}}{n_{sinc}} \right] \quad (46)$$

onde:

f_{sinc} = frequência síncrona do estator em hertz;

n_{sinc} = velocidade síncrona ($120f/p$) em rpm;

n_{conv} = velocidade do conversor em rpm;

f_e = frequência elétrica.

O sinal positivo da equação (46) é usado quando a direção de rotação é oposta à do campo rotativo do estator. A rotação com sinal de menos é aplicada quando a direção é a mesma que a do campo rotativo (FITZGERALD, 2008). Portanto:

$$f_{carga} = 2 \cdot f_{mec} \quad (47)$$

A frequência resultante da tensão na carga vai ser o dobro da frequência mecânica no eixo das máquinas. Outra forma de analisar a relação matemática entre as velocidades é feita por (BIM, 2018). Ainda conforme mostrado por (BIM, 2018), uma vez conhecida a frequência de alimentação ω_1 , a partir da Equação (48), se obtém as velocidades básicas de funcionamento para as máquinas de campo magnético girante, analisando as combinações entre as frequências ω_m e ω_2 expressa em radianos elétricos por segundo.

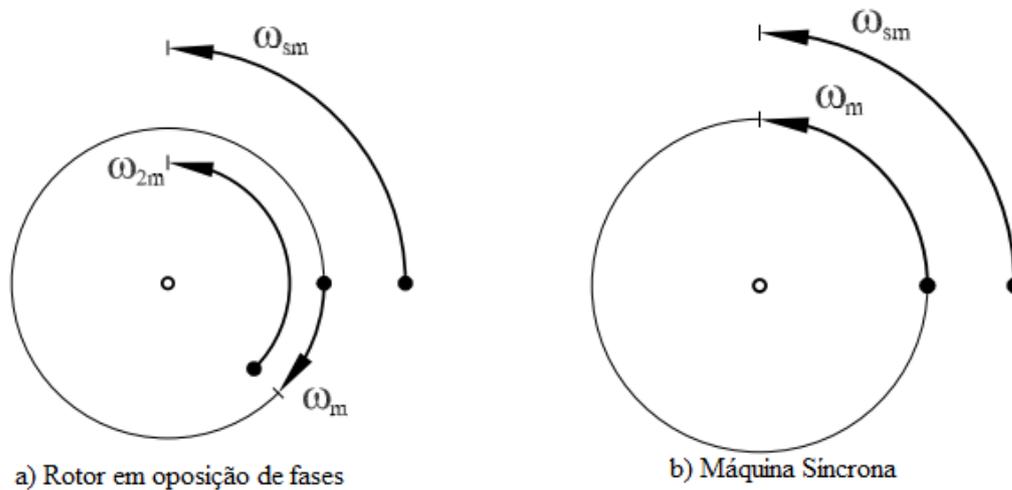
$$\omega_1 = \omega_2 + \frac{p}{2} \cdot \omega_m \quad (48)$$

Generalizando a relação matemática entre as velocidades em ambos sentidos de rotação de eixo para o caso do estator ser alimentado com sequência de fases invertida, a equação 4 pode ser expressa em (radianos elétricos) pela expressão (49)

$$\omega_{sm} = \pm(\omega_{2m} \pm \omega_m) \quad (49)$$

Tal relação entre as velocidades é ilustrada na Figura 3.3.

Figura 3.3 — Relação matemática entre as velocidades ω_1 , ω_2 e ω_m



Fonte: Adaptado de (BIM, 2018).

- a) Rotor com velocidade oposta ao da onda de FMM do estator ou seja, $\omega_m < 0 \Rightarrow 1 < s \leq 2$, a onda de FMM do rotor gira no mesmo sentido da FMM de estator, mas o rotor gira em sentido contrário. Este é um caso típico do rotor girando em oposição de fase em relação ao fluxo magnetizante do estator. Seu funcionamento é semelhante ao funcionamento da máquina de indução no modo freio.
- b) Rotor com velocidade síncrona e no mesmo sentido da onda de FMM do estator: $\omega_m = 2\omega_1 / p \Rightarrow s = 0$. Neste caso, o rotor gira no mesmo sentido da FMM do estator e na mesma velocidade; a tensão induzida no circuito de rotor é nula por ser alimentada por uma corrente contínua.

3.2 MULTIPLICAÇÃO DE FREQUÊNCIA NA CARGA

Um aumento de frequência compatível com a rede ou a carga pode ser facilmente alcançada por conversores de frequência. No entanto, esses dispositivos em frequências de comutação têm desvantagens, tais como a baixa durabilidade e o custo mais elevado que são significativamente maiores do que as máquinas que os controlam. Em segundo lugar, os

conversores eletrônicos de potência poluem a frequência de alimentação com tensões harmônicas e componentes de corrente. As soluções para esses problemas de harmônicos aumentam os custos do conversor eletrônico exigindo maiores investimentos de capital inicial.

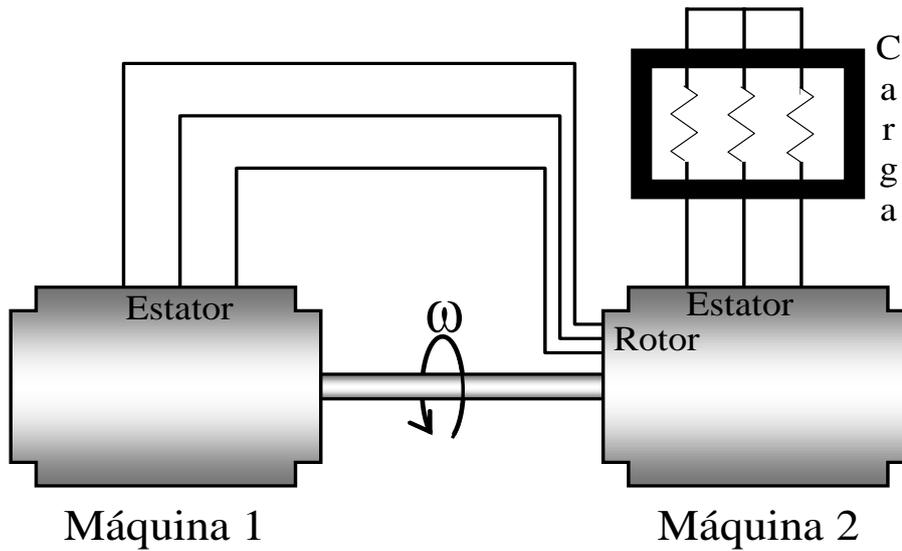
A duplicação da frequência de carga foi proposta por (FARRET; GASPARIN, 2019) para a sincronização mecânica de duas máquinas elétricas, uma máquina de indução de rotor bobinado (MI) e uma máquina síncrona (MS). Ambas as máquinas eram acionadas por um eixo comum, mas acoplados de tal maneira que tenham velocidades opostas entre si. O princípio proposto neste capítulo é a simulação de turbina eólica como fonte primária, um motor de indução do tipo gaiola para geração de energia conectado aos terminais de um gerador de indução com rotor bobinado para multiplicar a frequência da tensão gerada.

Um exemplo diagramático da sincronização mecânica de máquinas elétricas é mostrado nas Figuras 3.4 e 3.5 usando uma máquina de indução (MI) com rotor bobinado e uma máquina síncrona (MS) (FARRET; GASPARIN, 2019). Ambas as máquinas são acopladas por um eixo comum de tal forma que têm velocidades opostas uma a outra. O princípio proposto na simulação deste exemplo utiliza uma turbina eólica como fonte primária, um gerador elétrico síncrono para alimentar os terminais do rotor bobinado do gerador de indução duplicando assim a frequência da tensão gerada. A Figura 3.4 mostra as conexões mecânica e elétrica para se obter uma velocidade múltipla relativa dos geradores elétricos. Na Figura 3.5 as fases elétricas têm uma frequência relativa multiplicada ω_n a partir da frequência fundamental ω girando em oposição de fases (FARRET; GASPARIN, 2019). Observe-se que as fases podem ser vistas como invertidas em relação a sua rotação fundamental.

3.2.1 Multiplicação de frequência com geradores sincronizados mecanicamente

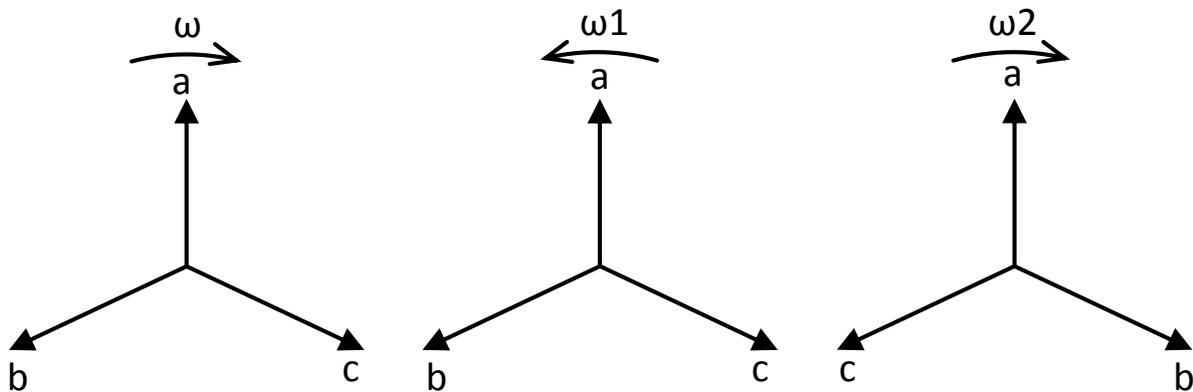
As mesmas equações aplicadas neste capítulo foram descritas acima no capítulo anterior referentes a frequência elétrica, ao escorregamento síncrono da velocidade e ainda para a relação de movimento entre o fluxo magnético do estator com frequência elétrica f_e dos condutores do rotor. Para as máquinas com diferentes combinações de polos aplica-se a fórmula descrita a seguir.

Figura 3.4 — Conexões elétrica entre as máquinas



Fonte: Autor.

Figura 3.5 — Diagrama de vetores, oposição de fases nos geradores elétricos



Fonte: Autor.

A equação (50) expressa uma multiplicação de frequência usando duas máquinas sincronizadas mecanicamente e em rotações opostas com números diferentes de polos. É baseado no princípio de um fator de escorregamento $s > 1$ para as máquinas de rotações opostas. A frequência resultante da máquina 2 pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$f_2 = \left[1 + \frac{P_2}{P_1} \right] \cdot f_1 \quad (50)$$

onde:

f_1 = frequência de saída da máquina 1 (Hz);

f_2 = frequência de saída da máquina 2 (Hz);

p_1 = número de polos da máquina 1;

p_2 = número de polos da máquina 2.

Para um número igual de polos em ambas as máquinas, a taxa de escorregamento obedece apenas ao critério usual para uma frequência dobrada. Os valores da velocidade síncrona do eixo e da frequência de carga estão de acordo com as fórmulas (44) e (45), respectivamente. A equação (50) expressa as múltiplas frequências resultantes da conexão de duas máquinas com número de polos diferente.

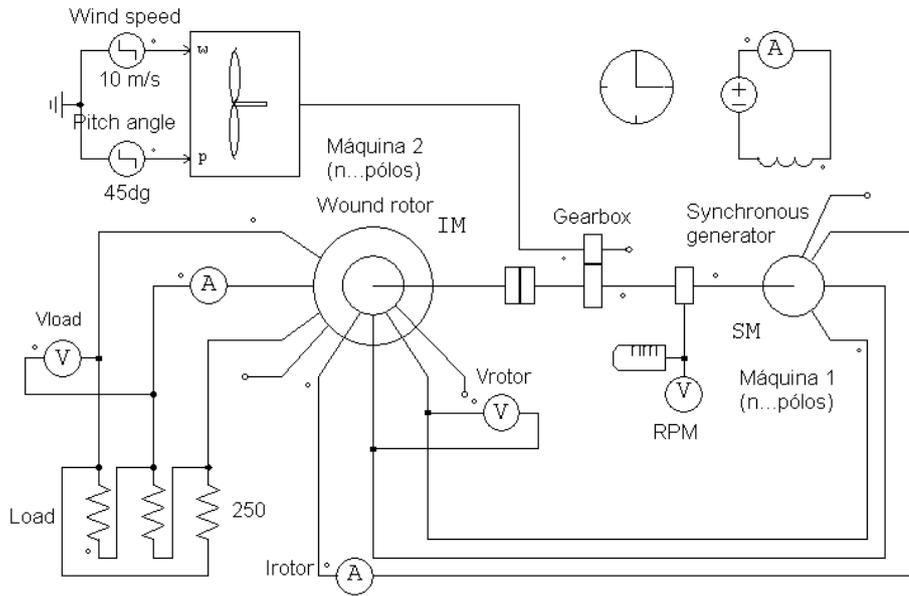
O potencial gerado por duas máquinas sincronizadas mecanicamente e eletricamente é comprovado por (FARRET; GASPARIN, 2019), a frequência de saída da máquina 2 é duplicada. Neste estudo é mostrado que a multiplicação de frequência pode usar qualquer tipo de máquina elétrica, como BLDC, MI, MS, com a máquina 1 conectada ao campo oposto à máquina 2 ou ao enrolamento do rotor. Como mencionado acima, a máquina elétrica sincronizada mecanicamente como um segundo gerador e conectada através de um eixo comum deve necessariamente ter enrolamentos de estator e de rotor.

Algumas limitações devem ser consideradas para uma conexão à rede pública, entre elas a faixa de velocidade limitada pela fonte primária. Idealmente, a frequência dessa fonte de geração precisa ser igual a da frequência da rede no instante do sincronismo. Uma exceção a esta regra é o uso de um gerador de indução com frequência de rotação acima da rede elétrica.

O esquema da Figura 3.6 mostra a frequência resultante nos terminais da máquina 2 (gerador de saída). Ao usar esse conjunto, várias simulações foram realizadas com quatro combinações distintas de polos da máquina, conforme mostrado na Tabela 3.1.

Durante a simulação do circuito da Figura 3.6 alternou-se o número de polos das máquinas síncrona e de indução. O fator de multiplicação da frequência resultante produzidas pela máquina síncrona e de saída para a carga estão listadas na Tabela 3.1.

Figura 3.6 — Simulação com MS e MI para um número distinto de polos



Fonte: Autor.

Tabela 3.1 — Frequências resultantes para um número distinto de polos

Polos MS ($p1$)	Polos MI ($p2$)	Fator de Multiplicação f_2
2	2	2
2	4	3
2	6	4
2	8	5
4	2	1,5
4	4	2
4	6	2,5
4	8	3
4	10	3,5
4	12	4
6	4	1,667
10	4	1,4
2	12	7

Fonte: Autor.

3.2.2 Máquina de indução para multiplicação de frequência

Para injetar energia a rede pública quando o gerador é do tipo de indução de gaiola de esquilo, a velocidade desta máquina deve exceder a velocidade síncrona. Como tal, torna-se um gerador que fornece uma energia ativa P ao sistema elétrico ao qual está conectado. No entanto, para criar seu campo magnético, esta máquina precisa absorver da rede uma potência reativa Q . Essa energia só pode vir da linha CA, pois circula na direção oposta à potência ativa (SIMÕES; FARRET, 2015). Por sua vez, a energia ativa fornecida à rede elétrica é diretamente proporcional ao escorregamento acima da velocidade síncrona. Assim, a uma velocidade mais alta que a síncrona, o gerador fornece uma energia ativa à rede diretamente proporcional ao escorregamento acima da velocidade síncrona. Quanto maior a velocidade desta máquina, maior a quantidade de energia fornecida à rede. A potência reativa da máquina de indução para funcionar como gerador pode ser obtida a partir de um grupo de capacitores conectados em paralelo através de seus terminais (CHAPMAN, 2013).

3.3 GERADORES PARA DIFERENTES TIPOS DE CARGAS

Nesta seção avalia-se o comportamento da tensão e da corrente que podem ser fornecidas por geradores com multiplicador mecânico de frequência quando conectados a uma carga. São feitas análises sob diferentes condições de carga e de conexão à rede de distribuição para avaliar o comportamento da potência gerada.

3.3.1 Operação Isolada De Geradores Sincronizados Mecanicamente

A operação isolada dos geradores com multiplicação mecânica de frequência consiste em se conectar uma carga diretamente na saída destas máquinas para se observar os níveis de potência, tensão e corrente em seus terminais de saída. Para testar o desempenho destes geradores são utilizadas cargas com diferentes características.

Nos testes de laboratório foi utilizado um motor DC como máquina principal para acionar ambos os geradores com potência nominal de 2 kW, tensão e corrente da armadura 170V/15A com tensão e corrente do campo de 180V/1,1A. Para a excitatriz acionadora (máquina 1) foi usado um motor assíncrono do tipo gaiola. A máquina 2 foi um motor de indução de rotor bobinado, ambas as máquinas de quatro polos. Os dados de placa para as duas máquinas de indução são mostrados na Tabela 3.2.

Os parâmetros da máquina 1 foram calculados de acordo com ensaios a vazio e de rotor bloqueado. Já para a máquina 2 estes valores são fornecidos pelo fabricante. Estes parâmetros são mostrados na Tabela 3.3.

a) *Geradores de indução alimentando uma carga*

Para a operação autônoma do gerador de indução, é necessário conectar um banco de capacitores trifásico em seus terminais, De acordo com a curva de excitação vista no capítulo 2, a reatância capacitiva será uma linha reta passando pelo zero e sua inclinação é dada por:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (51)$$

De acordo com (SIMÕES; FARRET, 2015), o circuito equivalente de um gerador de indução alimentando cargas em paralelo é como o mostrado na Figura 5.1.

Analisando o circuito da Figura 3.7, a reatância paralela X_p relativa a carga pode ser determinada pela equação (52):

$$X_p = \frac{\left(\frac{R_1}{F} + \frac{R_2}{F_s}\right) + (X_1 + X_2)^2}{X_1 + X_2} \quad (52)$$

Tabela 3.2 — Dados de placa para as máquinas

Parâmetro	Motor 1	Motor 2
Potência (kW)	0,75	0,37
Isolação	IP55	F
Rotação (rpm)	1730	1700
Tensão (V)	220/380	220/380
Corrente (A)	2,98/1,73	1,6/0,9
Tensão rotor (V)	-	108
Corrente no rotor (A)	-	2,2
I_p/I_n	8,0	-
Número de polos (p)	4	4

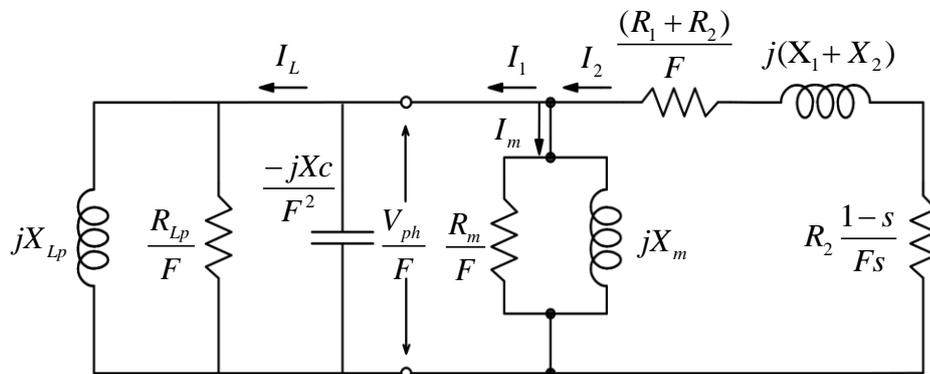
Fonte: Autor.

Tabela 3.3 — Parâmetros do modelo gerado no software de simulação

Parâmetro	M1	M2
Resistência do estator (R_s)	6,95 Ω	16,2 Ω
Indutância do estator (L_s)	62 mH	53 mH
Resistência do rotor (R_r)	7,18 Ω	9,45 Ω
Indutância do rotor (L_r)	62 mH	53 mH
Indutância de magnetização (L_m)	440 mH	970 mH
Relação de espiras entre enrolamento do estator e rotor (N_s/N_r)	-	2,075
Número de polos (p)	4	4
Momento de inércia da máquina em (J)	0,012 kg.m ²	0,006 kg.m ²

Fonte: Autor.

Figura 3.7 — Circuito equivalente do gerador de indução com carga em paralelo



Fonte: Adaptado de (SIMÕES; FARRET, 2015).

onde:

V_{ph} = Tensão terminal da fonte;

Fs = Frequência em função do escorregamento;

I_L = Corrente na carga;

F = Frequência de base em p.u.

A energia que impulsiona o gerador de indução é a máquina primária 1 em forma de potência ativa equilibrada e dada pela Equação (53) permite avaliar o desempenho do gerador de indução (SIMÕES; FARRET, 2015).

$$\sum P = I_2^2 \cdot R_2 \frac{1-s}{s} + I_2^2 \cdot (R_1 + R_2) + \frac{V_{ph}^2}{R_m} + \frac{V_{ph}^2}{R_{LP}} = 0 \quad (53)$$

$$\sum Q = \frac{V_{ph}^2}{X_p} + \frac{V_{ph}^2}{X_m} - \frac{V_{ph}^2}{X_c} + \frac{V_{ph}^2}{X_{LP}} = 0 \quad (54)$$

onde:

$$X_m = \omega_s \cdot L_m \quad (55)$$

O primeiro termo da Equação (53) é a energia mecânica sendo fornecida ao gerador. O sinal deste termo é invertido quando $s > 1$ ou $s < 0$; ou seja, quando a máquina de indução funciona como freio ou como gerador (SIMÕES; FARRET, 2015).

A partir da Figura 5.1, ainda se obtém a seguinte expressão

$$\frac{V_{ph}^2}{F^2 \cdot I_2^2} = \left(\frac{R_2}{F_2} + \frac{R_1}{F} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \quad (56)$$

Ainda de acordo com (SIMÕES; FARRET, 2015), a curva de magnetização, também conhecida como curva de saturação ou excitação, está relacionada diretamente com a qualidade do ferro, dimensões do núcleo, geometria geral e enrolamentos da bobina. Em outras palavras, as características do gerador de indução determinam a tensão terminal para uma dada corrente de magnetização através dos enrolamentos. Desta forma a curva de magnetização é normalmente representada por um polinômio ou por uma expressão não linear, como segue:

$$L_m = a_0 + a_1 \cdot V_{ph} + a_2 \cdot V_{ph}^2 + a_3 \cdot V_{ph}^3 + a_4 \cdot V_{ph}^4 \quad (57)$$

É possível ainda relacionar a tensão de entreferro com a corrente de magnetização, mostrando também que a relação entre V_g e I_m pode ser estabelecida por meio da seguinte equação não linear:

$$V_g = F \cdot I_m (K_1 \cdot e^{k_2 \cdot I_m^2} + k_3) \quad (58)$$

onde:

K_1 , K_2 e K_3 são constantes a serem determinadas;

V_g é a tensão do entreferro através da reatância de magnetização;

F é a frequência em p.u., definida por

$$F = \frac{f}{f_{base}} \quad (59)$$

onde:

f = frequência do rotor;

f_{base} = é a frequência de referência usada nos testes para obter a curva de excitação.

A reatância de magnetização pode ser obtida neste caso, diretamente da Equação (59)

como

$$X_m = \omega.L_m = \frac{V_g}{I_m} F \left(K_1 \cdot e^{k_2 \cdot I_m^2} + K_3 \right) \quad (60)$$

Para determinar as três constantes do tipo K é necessário traçar a curva de magnetização da máquina e nela obter os três pontos de tensão e de corrente de magnetização. Uma boa precisão durante os testes é fundamental para estabelecer essas constantes. A Tabela 3.4 traz o resumo para a determinação das constantes.

Para extrair a curva de magnetização da máquina 1, cujos dados de placa são mostrados na Tabela 3.2, o motor assíncrono foi girado sem carga por um motor CC, com a corrente do estator aumentada progressivamente para se obter aumento de tensão em seus terminais. Os valores de tensão e corrente foram medidos nas três fases da máquina e as respectivas médias dos três valores necessários para o cálculo das constantes são mostrados na Tabela 3.4.

Com os valores da Tabela 3.5, é possível calcular a , b e c que representam a inclinação da curva de saturação. Obtém-se então os valores de $K_1 = 73,56$, $K_2 = - 6,05$ e $K_3 = 314,6$, respectivamente. Com os resultados do cálculo das constantes Ks calcula-se a tensão de entreferro $V_g = 198,6$ V.

Tabela 3.4 — Determinação das constantes K_s

Ordem	Corrente medida	Tensão medida	X_m	Fórmulas Para k_s
1	$I_{m1} = I_{m1}$	V_{g1}	$a = V_{g1} / I_{m1}$	$K_1 = (c - K_3) \left(\frac{a-b}{b-c} \right)^{\frac{49}{24}}$
2	$I_{m2} = 5I_{m1}$	V_{g2}	$b = V_{g2} / I_{m2}$	$K_2 = \frac{49}{24} \frac{\ln \left(\frac{b-c}{a-b} \right)}{I_{m3}^2}$
3	$I_{m3} = 7I_{m1}$	V_{g3}	$c = V_{g3} / I_{m3}$	$K_3 = \frac{b^2 - ac}{2b - (a+c)}$

Fonte: Adaptado de (SIMÕES; FARRET, 2015).

Tabela 3.5 — Valores de tensão e corrente na curva de magnetização

Nº Testes	V_g (V)	I_m (A)
1	41	0,173
2	273	0,865
3	381	1,211

Fonte: Autor.

Para o cálculo do banco de capacitores necessários para a auto excitação do gerador foram consideradas as características da máquina 2 uma vez que a máquina 1 é ligada diretamente aos terminais do estator desta máquina. Desta forma, para o dimensionamento da carga máxima, consideram-se os seguintes parâmetros:

Potência nominal: 0,37 kW;

Frequência nominal: 60 Hz;

Fator de potência: 0,7;

Velocidade do rotor: 950 rpm.

Para obter F tem-se $F = \frac{f}{f_{base}} = \frac{30}{60} = 0,5$ e a frequência de escorregamento é:

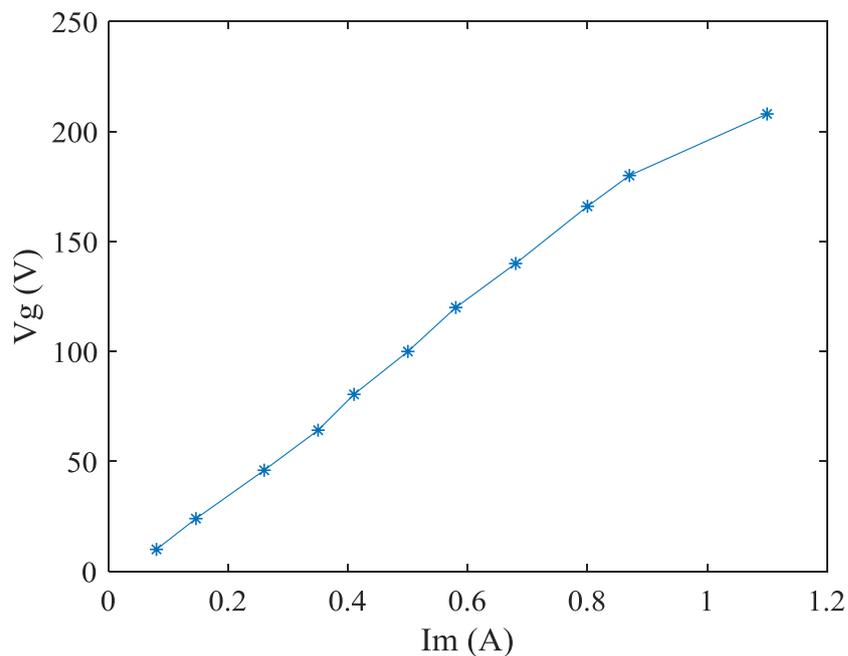
$$f_s = \frac{p \cdot n_s}{120} = 30$$

Com estes dados é possível aplicar as Equações (52) e (54) para achar o valor da capacitância necessária, que neste caso foi de $100 \mu\text{F}$ por fase.

O banco de capacitores e a velocidade das máquinas deve ser escolhido de forma que a corrente da armadura não exceda a corrente máxima de carga da máquina. Para esse estudo, a máquina 1 deve ter um banco de capacitores capaz de manter sua excitação e a tensão em seus terminais quando for conectada uma carga nos terminais de saída da máquina 2.

Através dos valores de tensão e corrente medidos em laboratório plota-se a curva de magnetização da máquina 1 que é mostrada na Figura 3.8.

Figura 3.8 — Curva de magnetização para máquina 1



Fonte: Autor.

A Figura 3.8 mostra os vários pontos de medição com relação a tensão de entreferro e a corrente magnetizante do gerador 1. Tais valores expressam as faixas de corrente de magnetização, necessária para o cálculo da indutância e reatância de magnetização.

3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo propõe um método de duplicação da frequência de carga nos terminais de um gerador (máquina 2) em relação à frequência básica do rotor obtida a partir dos terminais do estator de uma máquina geradora de energia (máquina 1). Apresenta ainda um método para multiplicar a frequência de saída de qualquer tipo de gerador elétrico usando máquinas elétricas com números diferentes de polos e acionadas mecanicamente por um eixo comum. A frequência resultante pode ser uma forma prática, estável e eficiente, para aumentar a velocidade dos fluxos, do vento ou do hidráulico através de geradores usando turbina sujeitas a baixas velocidades do fluxo primário. Este multiplicador de frequência mecânico ajuda a: 1) reduzir a taxa de velocidade dos multiplicadores de rotação; 2) reduzir a frequência de comutação dos conversores de potência; 3) ter a possibilidade de eliminar o conversor de potência.

Nesta dissertação é discutido como a alteração do número de polos de máquinas elétricas, pode multiplicar a frequência de carga para diversas alternativas. Acredita-se que esta solução estável possa ser viável para até dez vezes o número de polos de uma máquina em relação à outra. Note-se que qualquer tipo de gerador rotativo pode ser usado como gerador primário (gerador 1), geradores síncronos, PMSG, BLDC, gaiola de esquilo ou gerador de indução de rotor enrolado sem escova. A máquina secundária (gerador 2) fornecerá a carga elétrica, a qual deve ter, necessariamente enrolamentos no estator e no rotor, e simultaneamente possuir terminais.

Também é apresentada a metodologia de cálculo para um gerador de indução com multiplicador mecânico de frequência quando conectado a uma carga.

4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA MÁQUINAS SINCRONIZADAS MECANICAMENTE

O princípio de multiplicação de frequência proposto nesta dissertação é investigado por três simulações que utilizam uma turbina eólica como fonte primária. Na máquina 1 (excitatriz) são utilizados três tipos de geradores podendo ser PMSG, MI e MS para gerar a energia elétrica necessária e a segunda máquina um gerador de indução que dobra a frequência da tensão gerada. A turbina eólica é acoplada a uma caixa de engrenagens para aumentar a rotação relativa do eixo das máquinas acopladas. Na simulação, o modelo de turbina utilizado foi o disponível no PSIM. Estes parâmetros usados no software PSIM estão listados na Tabela 4.1. Este conjunto pode estabelecer a velocidade do vento, o ângulo de inclinação, a taxa de velocidade da caixa de velocidades e os parâmetros do gerador. O resistor de carga é conectado em Y ao longo da simulação, sendo o mesmo utilizado nos testes práticos de laboratório.

Tabela 4.1 — Parâmetros para a turbina eólica

Parâmetro	Valor
Potência nominal	20 kW
Velocidade básica do vento	10 m/s
Velocidade de rotação básica	10 rpm
Velocidade rotacional inicial	0,8 rpm
Momento de inércia	1 kg.m ²
Caixa de velocidades	600:1

Fonte: Autor.

A Tabela 4.1 mostra os parâmetros da turbina eólica usada nas simulações dos geradores descritos a seguir. A caixa de velocidades foi ajustada para diferentes valores durante as simulações afim de gerar diferentes frequência e também, de acordo com as características de cada gerador.

Na simulação da sincronização mecânica, os mesmos parâmetros fornecidos pelo fabricante da máquina 2 são utilizados ao longo das simulações. As frequências de saída dos geradores são baseadas na velocidade relativa do eixo em rpm de cada gerador. Obviamente, o fator de potência dependerá da carga conectada nos terminais da máquina 2. A tensão de saída

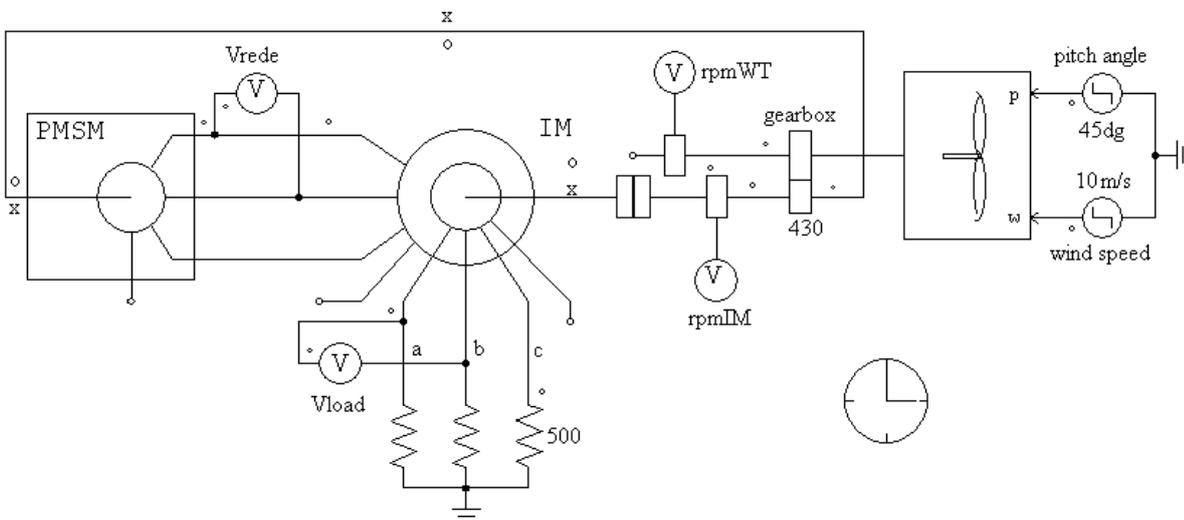
dependerá não apenas da velocidade, mas também das características e parâmetros de excitação de cada gerador. A frequência (f_e) de saída do gerador 1 verificada nas simulações obedece a equação (41) conforme descrita anteriormente, ou seja

$$f_{se} = \frac{n_{sm} \cdot P}{120}$$

4.1.1 Simulação com gerador PMSG

O conjunto formado por uma máquina com ímãs permanentes (PMSG) funcionando como gerador acoplado mecanicamente a um motor de indução com rotor bobinado é acionado por uma turbina eólica conforme mostra a simulação no PSIM, Figura 4.1. Os dados do gerador e da máquina de indução são apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3, e alimentam uma carga resistiva trifásica de 500 ohms por fase conectada em estrela. A velocidade do vento foi fixa de 10 m/s. Para a simulação deste circuito foram utilizados valores não convencionais de frequências e tensões para garantir a possibilidades de seu funcionamento em qualquer situação de tensão e corrente. A caixa de engrenagens foi ajustada para aumentar a rotação do eixo da turbina eólica nas taxas de 360/1 e 430/1. Consequentemente, a velocidade do motor foi de 803 e 956 rpm, respectivamente.

Figura 4.1 — Montagem da simulação no PSIM com o gerador PMSG



Fonte: Autor.

Tabela 4.2 — Parâmetros da máquina de indução usada no modelo PSIM

Parâmetro	Valor
Resistência do estator (R_s)	0,624 Ω
Indutância do estator (L_s)	6,14 mH
Resistência do rotor (R_r)	0,673 Ω
Indutância do rotor (L_r)	6,57 mH
Indutância de magnetização (L_m)	91,6 mH
Relação de espiras entre enrolamento do estator e rotor (N_s/N_r)	2,075
Número de polos (p)	4
Momento de inércia da máquina (J)	0,018 kg.m ²

Fonte: Autor.

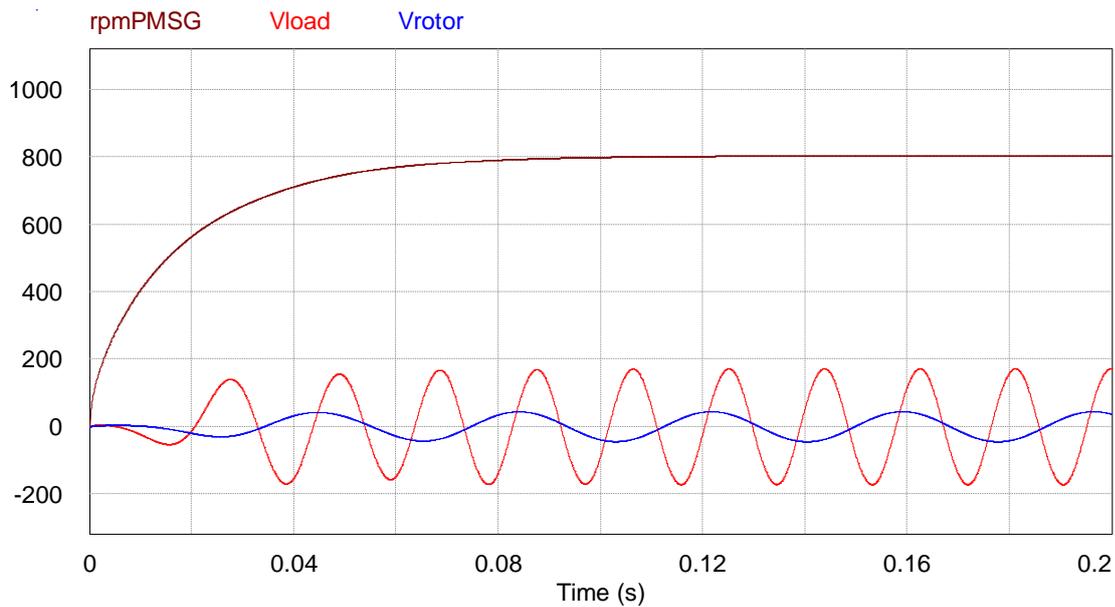
Tabela 4.3 — Parâmetros do gerador PMSG

Parâmetro	Valor
Resistência do estator (R_s)	4,3 Ω
Indutância de eixo direto (L_d)	0,027 H
Indutância de eixo em quadratura (L_q)	0,067 H
$V_{pk}/krpm$	98,97 V/rpm
Número de polos (p)	4
Momento de inércia (J)	0,01 kg.m ²
Constante de tempo de eixo	10 s

Fonte: Autor.

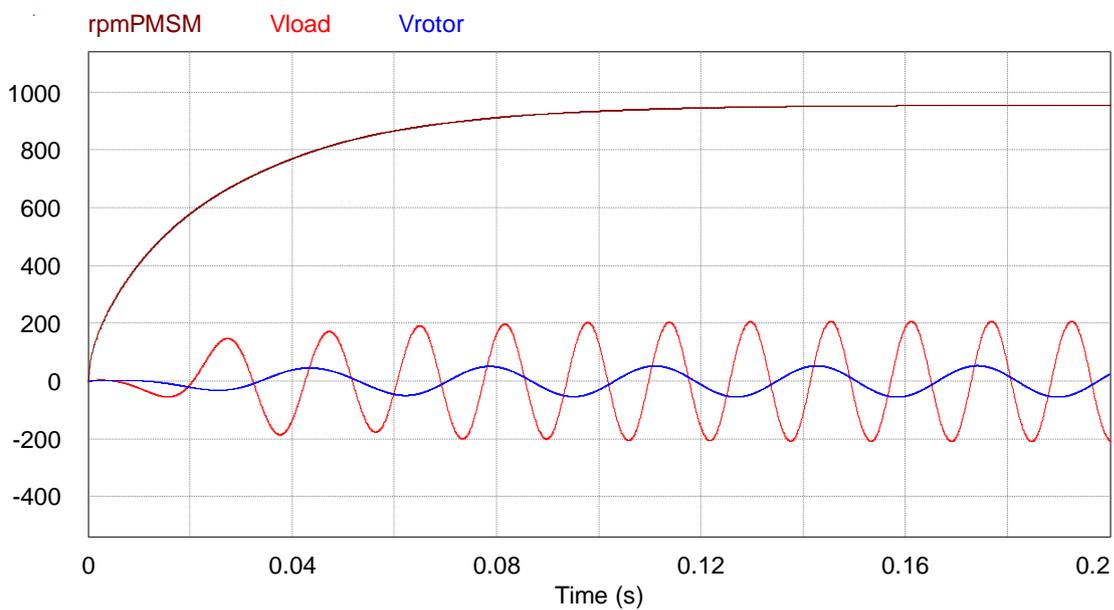
As formas de onda das Figuras 4.2 e 4.3 mostram os resultados da simulação em que ocorre a duplicação da frequência da tensão gerada, bem como um aumento da tensão nos terminais da carga. Nos resultados simulados mostrados na Figura 4.2 foi gerada uma frequência de 26,8 Hz pelo gerador de ímãs permanentes e verificada uma frequência de 53,5 Hz na saída da carga. Sob uma rotação de 803 rpm, foi gerada uma tensão pico a pico de 340 V nos terminais da carga.

Figura 4.2 — Formas das ondas de saída da carga e do gerador para 803 rpm



Fonte: Autor.

Figura 4.3 — Formas de onda de saída de carga e gerador para 956 rpm



Fonte: Autor.

A frequência duplicada para diferentes rotações foi confirmada por resultados simulados com os geradores sincronizados mecanicamente a 956 rpm, conforme representado nas formas de onda da Figura 4.3. Nesta figura é registrada uma frequência de 31,8 Hz gerada pela máquina síncrona e dobrada para uma frequência de 63,7 Hz na saída da carga. A tensão pico a pico na

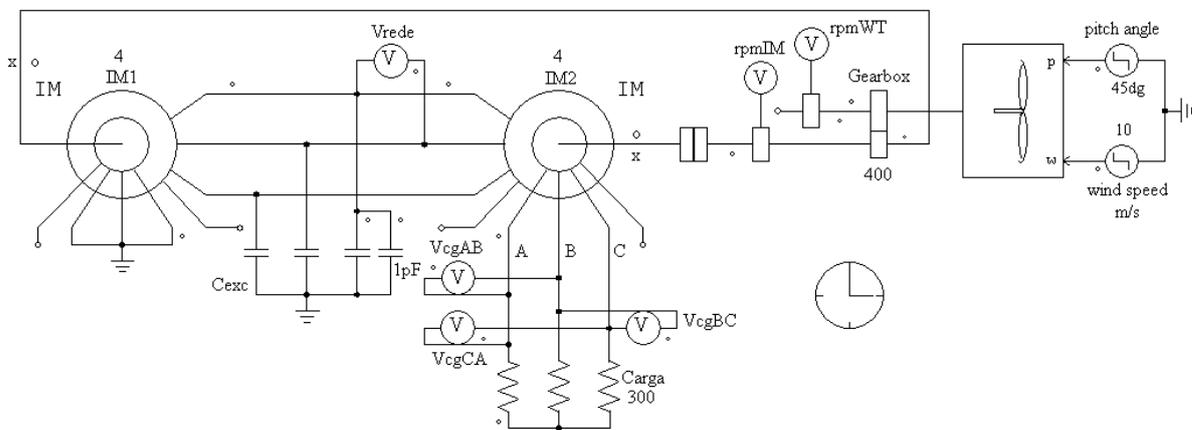
saída do gerador foi de 416 V. O gráfico de velocidade do gerador também é mostrado na Figura 4.3.

4.1.2 Simulação com gerador de indução

A simulação com gerador de indução utilizou um conjunto de dois geradores com rotor bobinado acoplados mecanicamente e acionado por uma turbina eólica conforme mostra a Figura 4.4. Os dados das máquinas são apresentados na tabela 2. Os geradores alimentam uma carga resistiva trifásica de 300 ohms por fase conectada em estrela. A velocidade do vento foi fixa de 10 m/s. O banco de capacitores é dimensionado de acordo com a corrente de magnetização da máquina 1, conforme mostra o apêndice C.

Como foi dito anteriormente, nas simulações do circuito foram utilizados valores não convencionais de frequências e tensões. A caixa de engrenagens foi ajustada para aumentar a rotação do eixo da turbina eólica nas taxas de 350/1 e 450/1. Conseqüentemente, a velocidade do motor era de 732 e 961 rpm, respectivamente.

Figura 4.4 — Montagem no PSIM para a sincronização mecânica dos geradores elétricos



Fonte: Autor.

Os parâmetros relacionados as duas máquinas de indução com rotor bobinado podem ser visualizados nas Tabelas 4.4 conforme segue.

Os resultados da simulação em que ocorre a duplicação da frequência da tensão gerada, bem como um aumento de tensão na carga são mostrados nas formas de onda das Figuras 4.5 e 4.6.

Nos resultados simulados mostrados na Figura 4.5 foi gerada uma frequência de 23,8 Hz pelo primeiro gerador e medida uma frequência de 47,6 Hz na saída da carga. Com uma rotação de 732 rpm, uma tensão pico a pico de 514 Vpp foi gerada nos terminais da carga. Durante a simulação foi possível perceber dependência da tensão e frequência geradas em relação a capacitância e a velocidade do eixo. Considerando que a carga foi fixa durante as simulações, para uma velocidade de eixo menor foi necessário aumentar o valor do banco de capacitores aumentando a potência reativa necessária para o surgimento de tensão nos terminais do gerador 1.

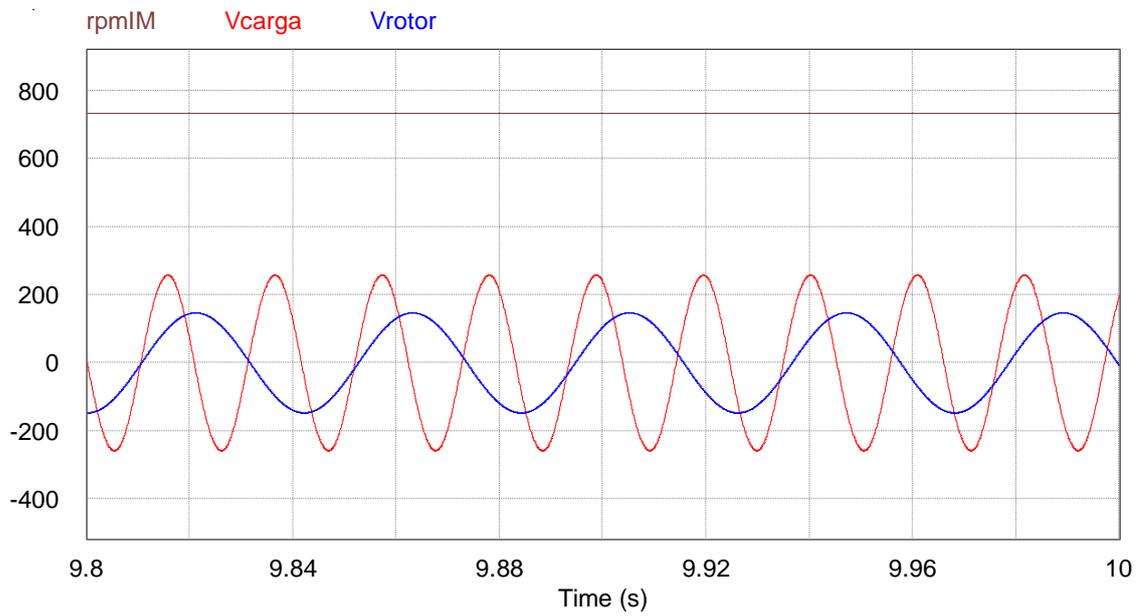
A frequência duplicada para diferentes rotações foi confirmada por resultados simulados com os geradores sincronizados mecanicamente a 961 rpm, conforme representado nas formas de onda da Figura 4.6. Nesta figura é registrada uma frequência de 31,5 Hz gerada pela máquina de indução auto excitada e dobrada para uma frequência de 63,5 Hz no gerador que alimenta a carga de saída. A tensão pico a pico na saída do gerador foi de 510 Vpp. O gráfico de velocidade do gerador também é mostrado na Figura 4.6.

Tabela 4.4 — Parâmetros das duas máquinas de indução usada no modelo PSIM

Parâmetro	Valor M1	Valor M2
Resistência do estator (R_s)	6,39 Ω	6,39 Ω
Indutância do estator (L_s)	29 mH	29 mH
Resistência do rotor (R_r)	4,69 Ω	4,69 Ω
Indutância do rotor (L_r)	16 mH	16 mH
Indutância de magnetização (L_m)	324 mH	324 mH
Relação de espiras entre enrolamento do estator e rotor (N_s/N_r)	1	2,075
Número de polos (p)	4	4
Momento de inércia da máquina em (J)	0,006 kg.m ²	0,006 kg.m ²
Capacitor de excitação por fase (μF)	400 ~ 700 μF	-

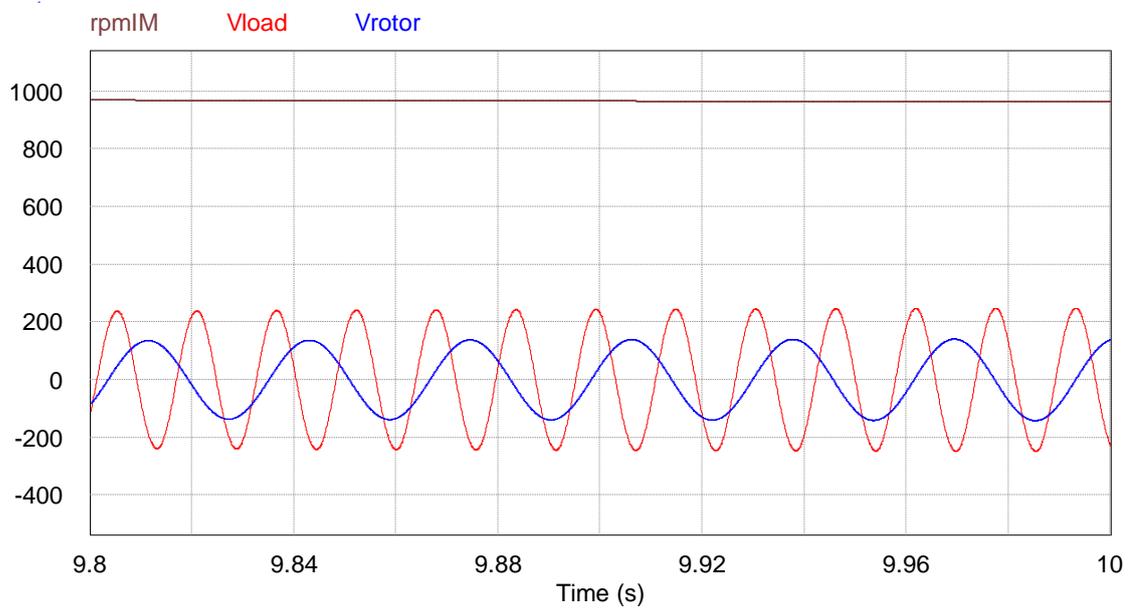
Fonte: Autor.

Figura 4.5 — Formas de onda de saída de carga e gerador para 732 rpm



Fonte: Autor.

Figura 4.6 — Formas de onda de saída de carga e gerador para 961 rpm



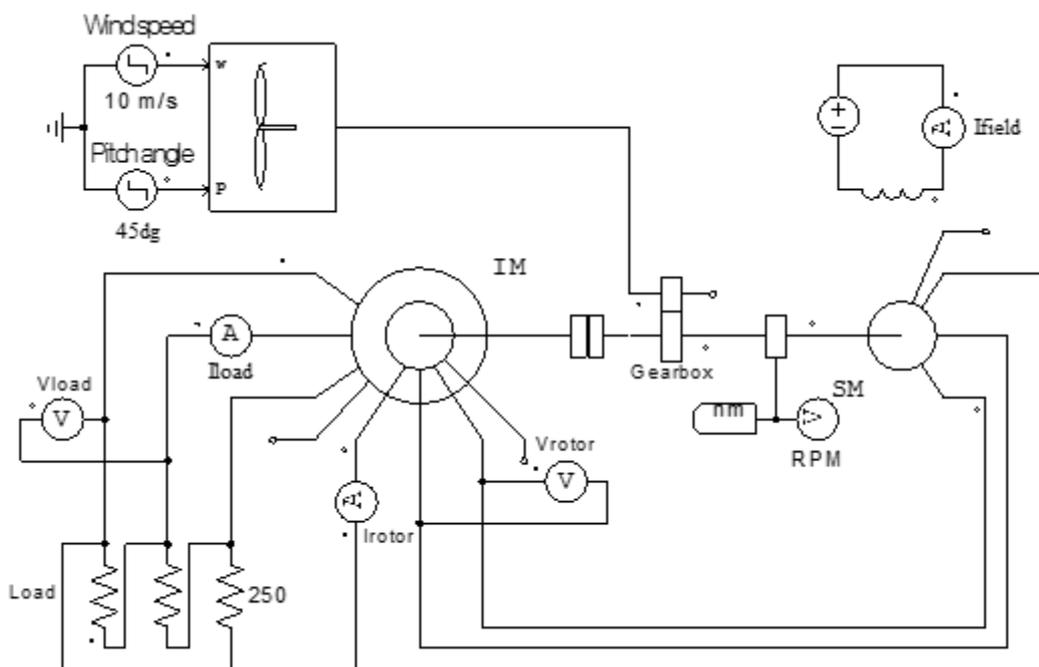
Fonte: Autor.

4.1.3 Simulação com gerador síncrono

Para simular o circuito da Figura 4.7 foram utilizados valores não convencionais de frequências e tensões. Uma caixa de engrenagens foi ajustada para aumentar a rotação do eixo da turbina eólica nas taxas de 108/1 e 130/1. Consequentemente, a velocidade do motor era de 756 e 910 rpm, respectivamente. Foi utilizada uma velocidade fixa do vento de 10 m/s. Os parâmetros reais da máquina são de acordo com o fabricante conforme as Tabelas 4.5 e 4.6.

As formas de onda das Figuras 4.8 e 4.9 são os resultados da simulação em que ocorre a frequência duplicada da tensão gerada, bem como um aumento de tensão na carga.

Figura 4.7 — Montagem no PSIM para simulação da sincronização mecânica de geradores elétricos



Fonte: Autor.

Nos resultados simulados que são mostrados na Figura 4.8 foi gerada uma frequência de 25,1 Hz pela máquina síncrona e observada uma frequência de 50,2 Hz na saída da carga. Sob uma rotação de 756 rpm, foi gerada uma tensão pico a pico de 181 V na carga.

Tabela 4.5 — Parâmetros da máquina de indução usada no modelo PSIM

Parâmetro	Valor
Resistência do estator (R_s)	0,624 Ω
Indutância do estator (L_s)	6,14 mH
Resistência do rotor (R_r)	0,673 Ω
Indutância do rotor (L_r)	6,57 mH
Indutância de magnetização (L_m)	91,6 mH
Relação de espiras entre estator e rotor (N_s/N_r)	2,736
Número de polos (p)	4
Momento de inércia da máquina em (J)	0,018 kg m ²

Fonte: Autor.

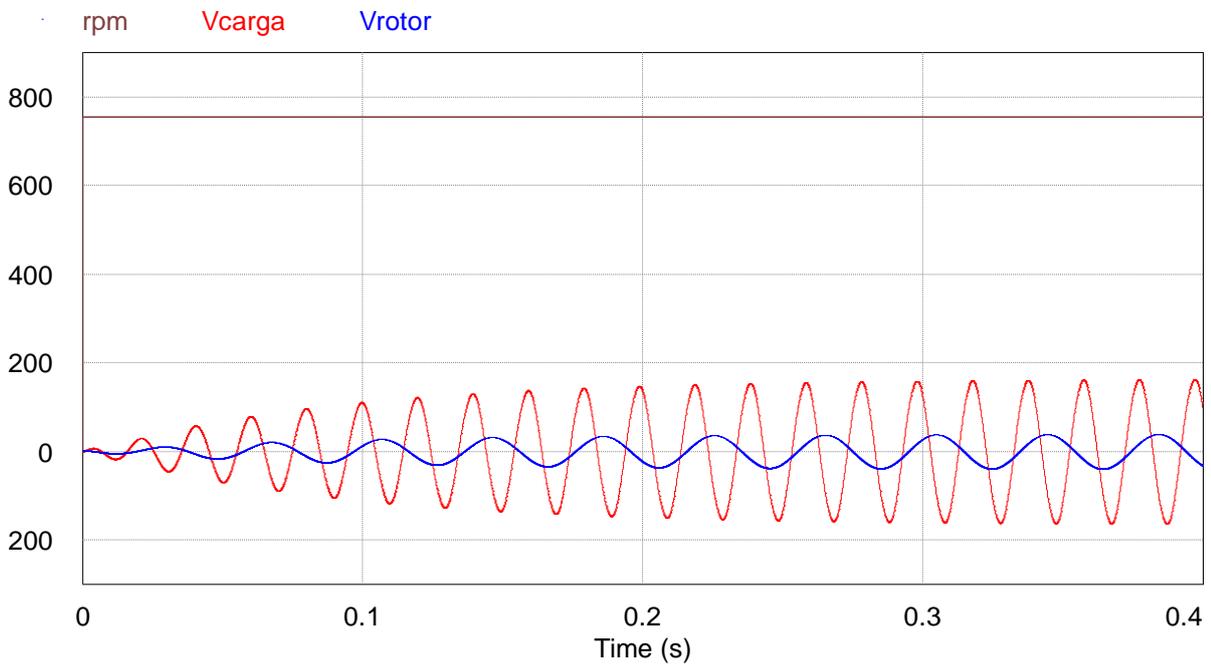
Tabela 4.6 — Parâmetros da máquina síncrona usada no modelo PSIM

Parâmetro	Valor
Resistência do estator (R_s)	1,47 Ω
Indutância do estator (L_s)	7,93 mH
Indutância magnetizante (<i>d-axis mag. ind</i>)	54,6 mH
Indutância magnetizante (<i>q-axis mag. ind</i>)	30,1 mH
Resistência do campo ref. ao lado do estator (R_f)	0,253 Ω
Indutância de dispersão do campo ref. ao lado do estator (L_{fl})	2,71 mH
Resistência do eixo direto da gaiola de amortecimento do rotor ref. ao estator (R_{dr})	12,9 Ω
Indutância de dispersão do eixo d do rotor referente ao lado do estator (L_{drl})	4,06 mH
Resistência do eixo q da gaiola de amortecimento do rotor referida ao lado do estator (R_{qr})	4,99 Ω
Indutância de vazamento do eixo q do rotor referida ao lado do estator (L_{qrl})	1,28 mH
Relação de espiras entre enrolamento do campo e estator (N_s/N_f)	0,0333
Número de polos (p)	4
Momento de inércia da máquina (J)	0,034 kg.m ²

Fonte: Autor.

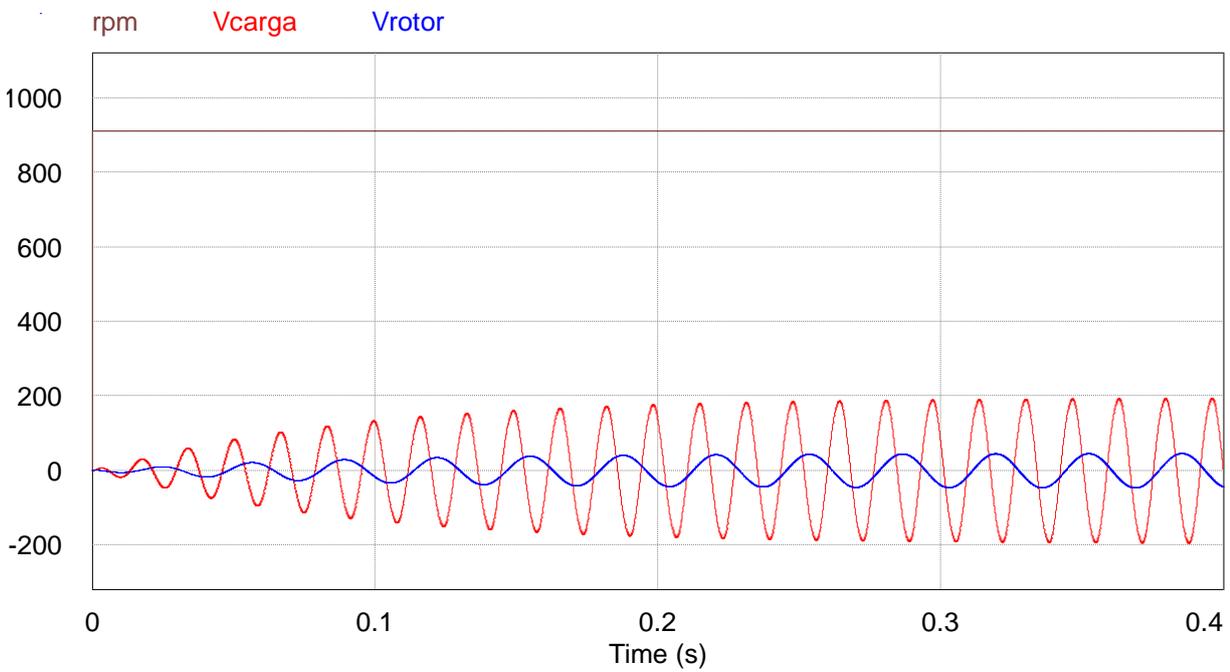
A frequência duplicada muda para diferentes rotações e foi confirmada por resultados simulados com os geradores sincronizados mecanicamente a 910 rpm, conforme representado nas formas de onda da Figura 4.9. Nesta figura é registrada uma frequência de 30,35 Hz gerada pela máquina síncrona e dobrada para uma frequência de 60,70 Hz na carga de saída. A tensão pico a pico na saída do gerador foi de 175 V. O gráfico de velocidade do gerador também é mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.8 — Formas de onda de saída de carga e gerador para 756 rpm



Fonte: Autor.

Figura 4.9 — Formas de onda de saída de carga e gerador para 910 rpm



Fonte: Autor.

4.2 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA DIFERENTES NÚMEROS DE POLOS

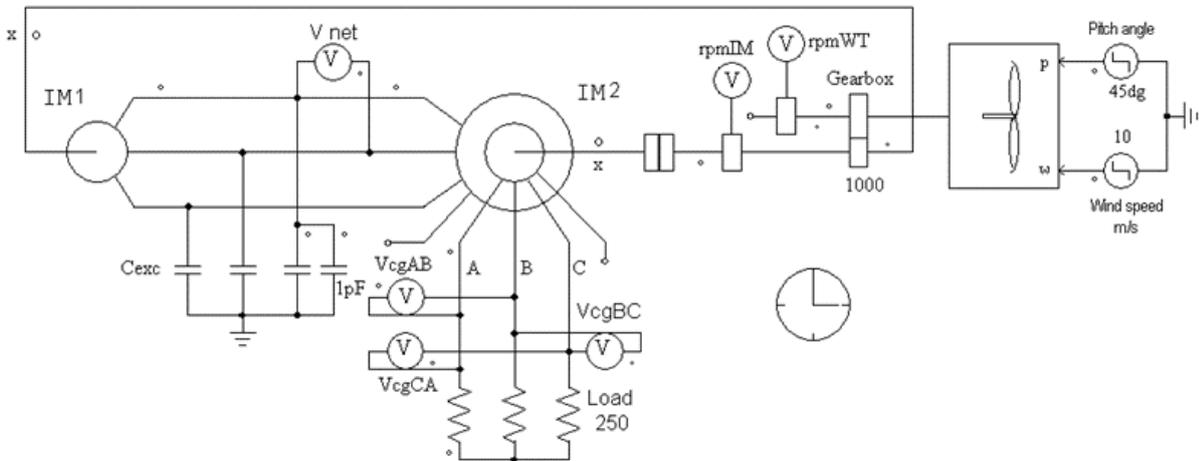
Para esta atividade prática se utilizou-se máquinas disponíveis em laboratório e com diferentes números de polos, notando-se que ao se alterar a quantidade de polos de um motor ou gerador altera-se a potência desta máquina devido a necessidade em alterar as ligações e quantidade de bobinas no estator, isto afeta significativamente o espaço ocupado pelos enrolamentos no estator e, conseqüentemente as dimensões da máquina.

Para simular o circuito mostrado na Figura 4.10 foram utilizadas frequências e tensões de acordo com as características das máquinas de indução. Uma caixa de engrenagens foi ajustada para aumentar a rotação do eixo da turbina eólica nas proporções 1000:1, 800:1, 550:1 e 400:1. Conseqüentemente, as velocidades do motor foram ajustadas de acordo com a velocidade mínima de excitação do primeiro gerador: 1927, 1546, 1030 e 749 rpm, respectivamente. A velocidade do vento fixa usada nesses testes foi de 10 m/s. Os parâmetros reais da máquina de rotor bobinado foram fornecidos pelo fabricante e os parâmetros da máquina de indução de gaiola de esquilo foram calculados a partir dos testes de laboratório.

Um segundo teste foi realizado usando a frequência resultante (f_2) definida pela equação (50) para a rotação e o número de polos de ambas as máquinas. É importante notar que nessas simulações foram utilizados os mesmos parâmetros das máquinas dos testes práticos para garantir uma boa comparação dos resultados. Através destes testes de laboratório foi possível levantar a curva de magnetização para cada um dos motores com diferentes números de polos e dados de placa. Considerando os limites de cada máquina foram realizados os ensaios a vazio e de rotor bloqueado, bem como o ensaio de corrente contínua para medir os parâmetros do enrolamento de estator.

No apêndice D são apresentados os valores obtidos em laboratório durante os ensaios citados, para determinação dos parâmetros dos motores de indução.

Figura 4.10 — Montagem no PSIM para a simulação da sincronização mecânica de dois geradores elétricos



Fonte: Autor.

A Tabela 4.7 mostra dados de placa das máquinas de indução usadas para obter as curvas de magnetização e os respectivos valores do banco de capacitores de auto excitação.

Os parâmetros do fabricante da máquina de indução com rotor bobinado estão listados na Tabela 4.8 para ambas as simulações do motor com rotor bobinado e com uma potência de 0,37 kVA. Também estão listados os parâmetros das máquinas de indução MI, usadas como gerador de indução auto excitado.

Segue uma descrição dos resultados simulados para as quatro combinações do número de polos entre as máquinas elétricas.

Tabela 4.7 — Dados de placa para a máquina 1

Número de polos	Potência (CV)	Tensão nominal (V)	Rotação (rpm)	Capacitor de excitação (μF)
2	0,75	220/380	3480	18
4	0,46	220	1750	15
6	0,38	220	1100	15
8	0,25	440	860	8

Fonte: Autor.

Tabela 4.8 — Parâmetros da máquina de indução com rotor bobinado usada no modelo PSIM

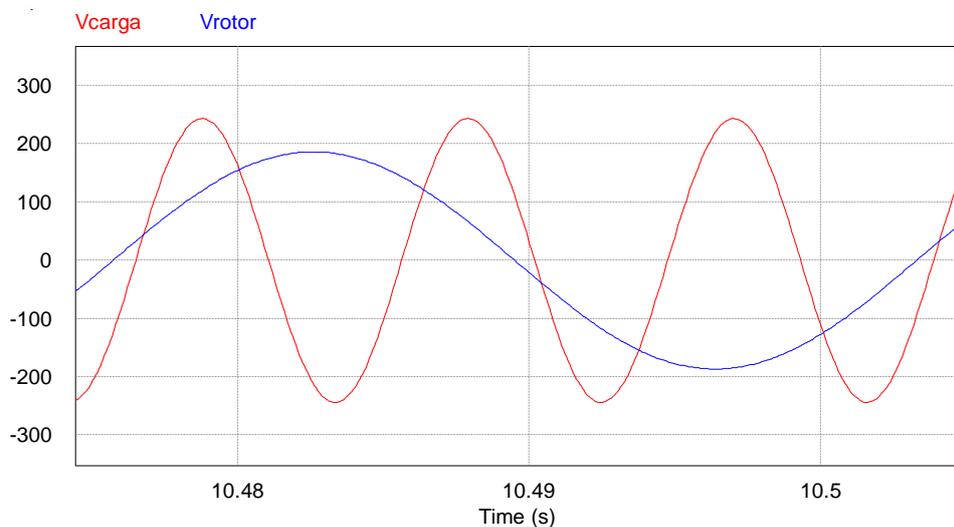
Parâmetro	MI 2	Máquinas de indução gerador 1			
	Valor	Valor			
Resistência do estator (R_s)	6,39 Ω	8,1 Ω	8,0 Ω	12,5 Ω	71,5 Ω
Indutância do estator (L_s)	29 mH	67,0 mH	34 mH	53 mH	0,35 H
Resistência do rotor (R_r)	4,69 Ω	7,1 Ω	6,9 Ω	12 Ω	65,2 Ω
Indutância do rotor (L_r)	16 mH	67,0 mH	34 mH	53 mH	0,35 H
Indutância de magnetização (L_m)	324 m	629 mH	333 m	376 m	1,6 H
Relação de espiras entre estator e rotor (N_s/N_r)	2,075	-	-	-	-
Número de polos (p)	4	2	4	6	8
Momento de inércia (J)	0,006 kg.m ²	0,006 kg.m ²			

Fonte: Autor.

4.2.1 Combinações de geradores com 2x4 polos

Nos geradores de dois e quatro polos, as frequências e tensões geradas foram de 31,4 Hz e 95,6 Hz para uma velocidade de 1927 rpm, como mostra a Figura 4.11 (proporção 1: 3). As tensões efetivas dos geradores foram 237 V e 206 V, respectivamente.

Figura 4.11 — Formas de onda para geradores com 2x4 polos a 1927 rpm

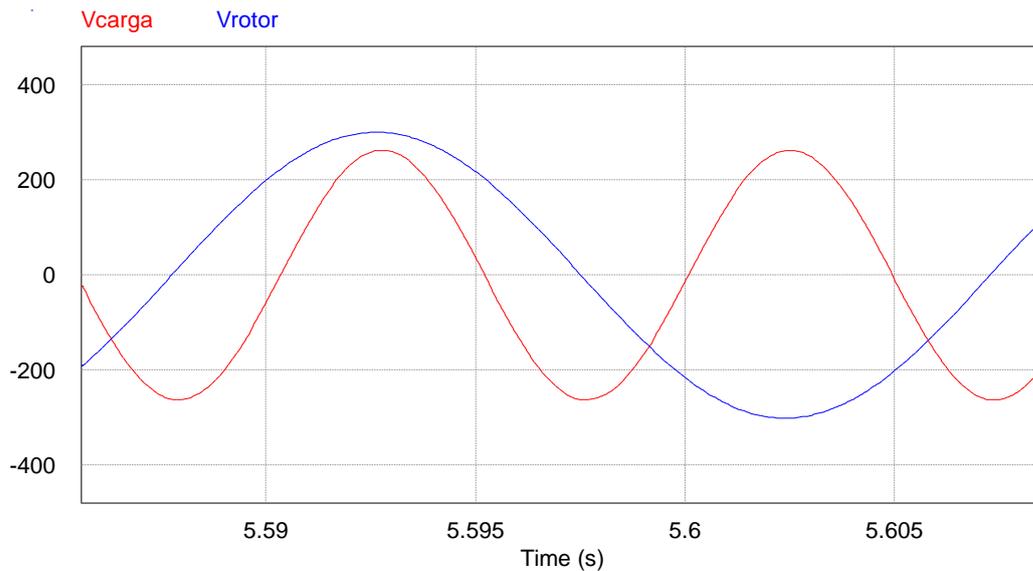


Fonte: Autor.

4.2.2 Combinações de geradores com 4x4 polos

Nos resultados da Figura 4.12 houve uma frequência de 51,7 Hz na saída do gerador 1 e 102,5 Hz na saída de carga produzida pelo gerador 2 a uma rotação de 1546 rpm (relação 2:1). As tensões efetivas nos geradores foram de 201 V e 183 V, respectivamente.

Figura 4.12 — Formas de onda para geradores com 4x4 polos a 1546 rpm



Fonte: Autor.

4.2.3 Combinações de geradores com 6x4 polos

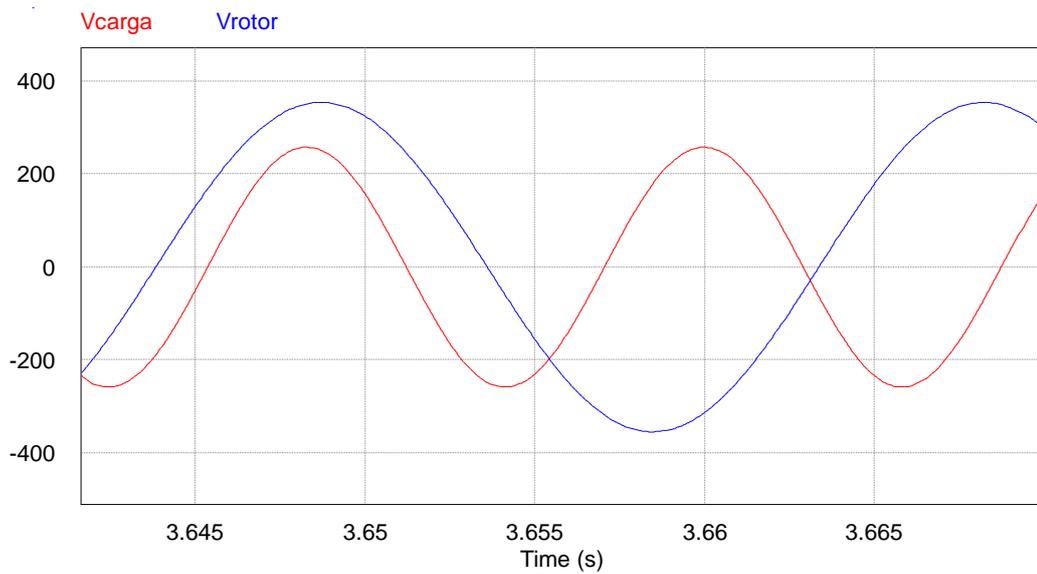
A frequência estável e multiplicada varia para diferentes rotações, conforme confirmado pelos resultados simulados nos geradores sincronizados a 1030 rpm cujas formas de onda são mostradas na Figura 4.13.

Os valores de saída registrados foram uma frequência de 51,18 Hz no gerador 1 e 87,7 Hz no gerador 2 (3:2). As tensões efetivas geradas nas respectivas máquinas foram 236,8 V para o gerador 1 e 181 V para o gerador 2.

4.2.4 Combinações de geradores com 8x4 polos

Um quarto teste foi realizado como mostrado na Figura 4.14 usando tensões de pico de 185,8 V no gerador 1 e 142,9 V no gerador 2.

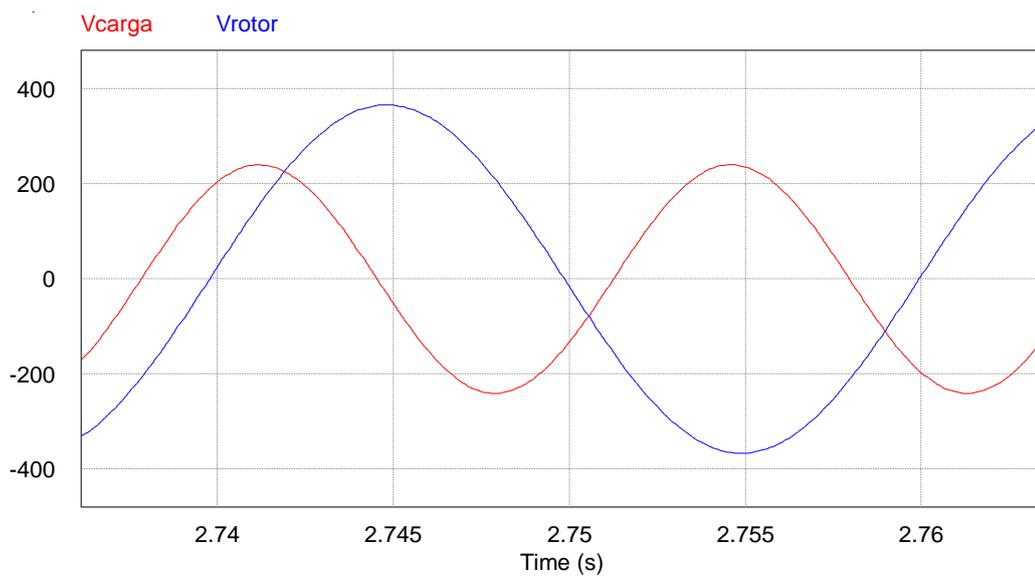
Figura 4.13 — Formas de onda para geradores com 6x4 polos a 1030 rpm



Fonte: Autor.

A velocidade média foi de 749 rpm. Com essa rotação foi possível gerar 49,74 Hz na máquina 1 e na máquina 2 a frequência de saída foi de 74,5 Hz (proporção 2:3).

Figura 4.14 — Formas de onda para geradores com 8x4 polos a 749 rpm



Fonte: Autor.

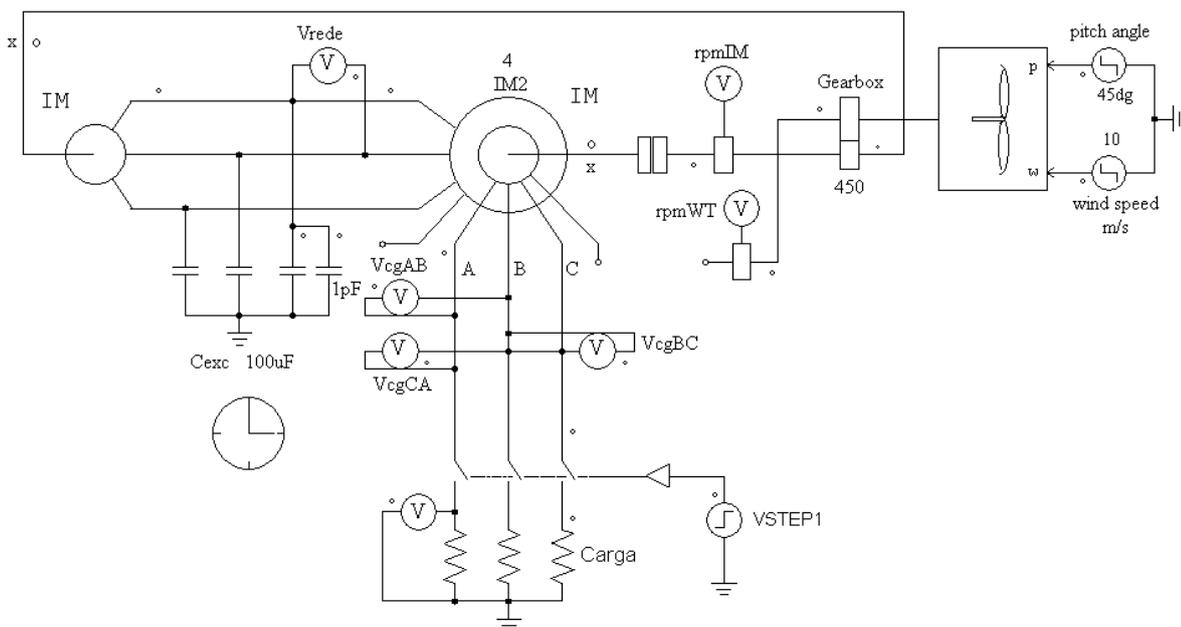
4.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA DIFERENTES CARGAS

Para simular o circuito da Figura 4.15 foram utilizados os parâmetros reais das máquinas usadas nos testes experimentais e dados na Tabela 3.3. A turbina eólica é simulada por uma máquina de CC com uma caixa de engrenagens para aumentar a rotação do eixo da turbina numa taxa de 450/1. Consequentemente, a velocidade do motor foi de 950 rpm para uma velocidade fixa do vento de 10 m/s.

Os valores das cargas usadas na simulação foram os mesmos utilizados em laboratório, ou o mais próximo possível. Os testes foram feitos com três diferentes tipos de cargas: resistiva, e indutiva e capacitiva.

Na montagem da Figura 4.15 foi utilizada uma chave tripolar para conectar a carga após 5 segundos do acionamento dos geradores, desta forma iniciando o processo de auto excitação da MI sem carga. Também é possível analisar os valores eficazes de tensão e corrente na carga após sua conexão.

Figura 4.15 — Montagem de simulação no PSIM para as máquinas sincronizadas mecanicamente alimentando uma carga



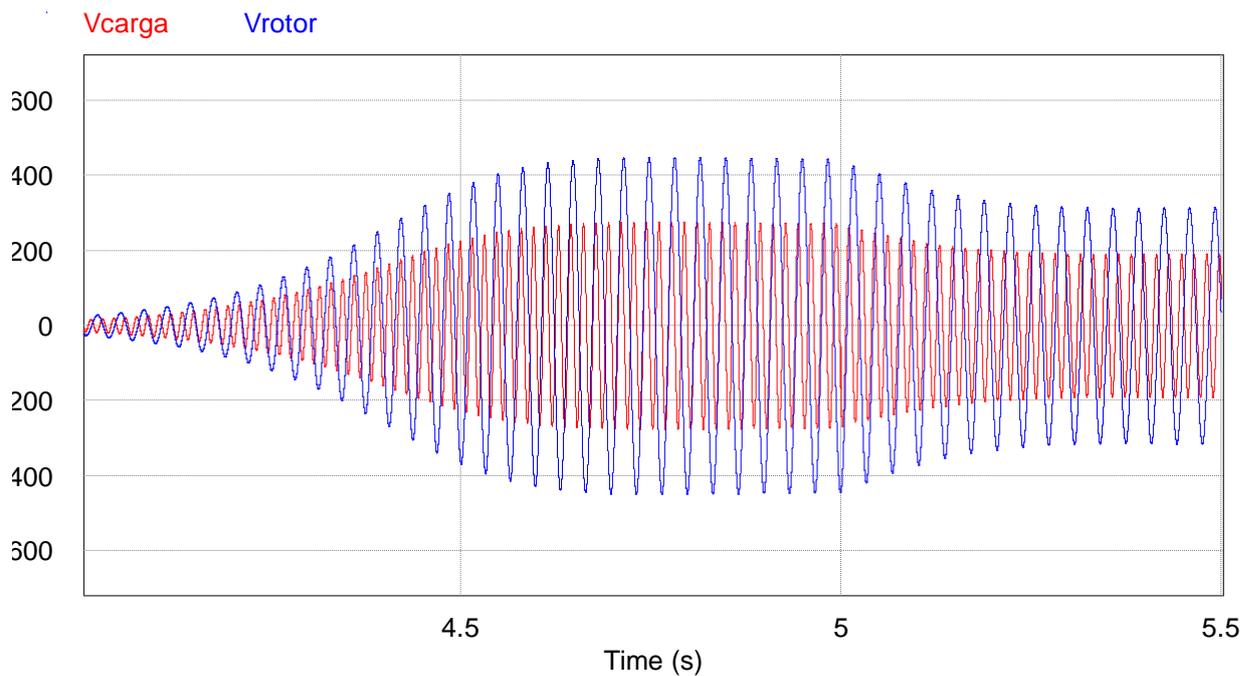
Fonte: Autor.

4.3.1 Resultados de simulação para carga resistiva trifásica

A simulação utilizando uma carga resistiva trifásica de 250Ω por fase conectada em Y. A conexão da carga ocorre no instante de 5 segundos. Os resultados para as formas de onda de tensão são mostrados na Figura 4.16.

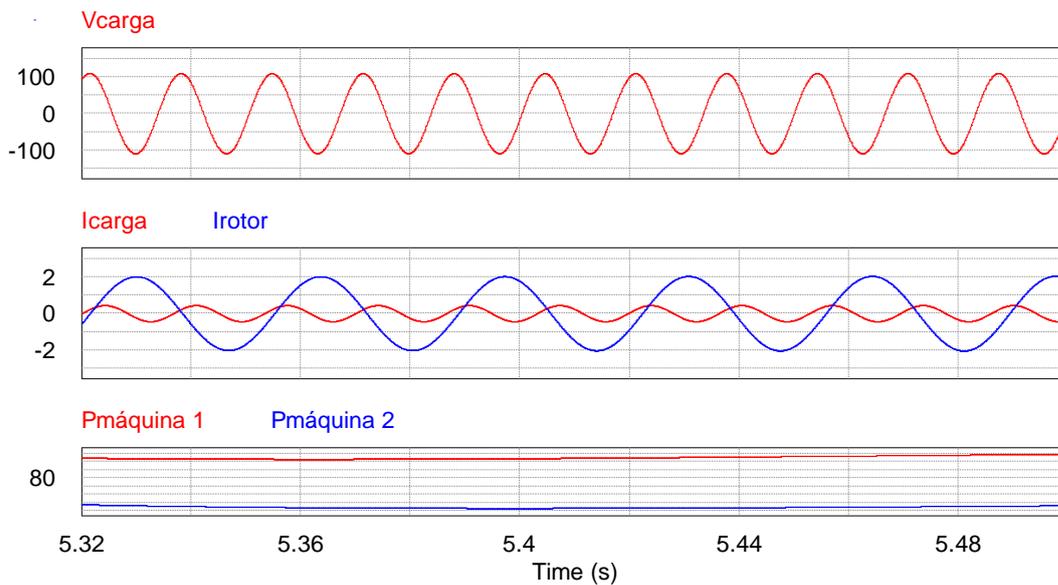
A tensão de saída para a carga é de $96,2 \text{ V}$ e as correntes de estator e rotor são de $1,47 \text{ A}$ e $0,311 \text{ A}$, respectivamente. As velocidades usadas para as máquinas de indução foram de 1023 rpm e após a conexão da carga foi de 914 rpm .

Figura 4.16 — Tensão de saída nas máquinas com carga resistiva



Fonte: Autor.

Figura 4.17 — Tensão na carga e correntes de entrada e saída na máquina 2



Fonte: Autor.

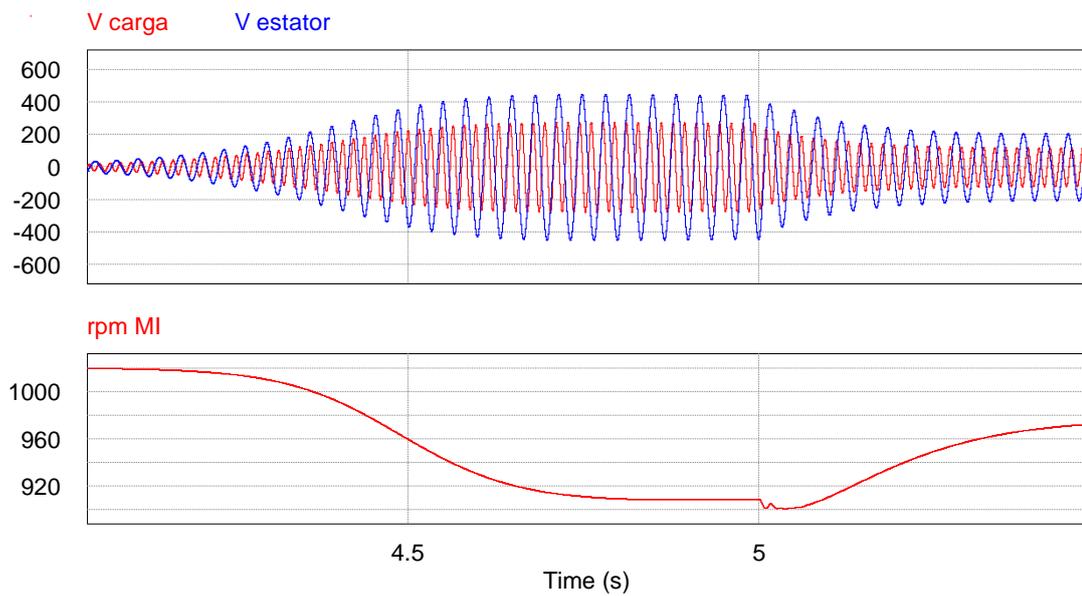
Analisando o sub gráfico da Figura 4.17, a potência elétrica de saída na máquina 1 é de 86 W e na máquina 2 a potência de saída é de 73 W.

4.3.2 Resultados de simulação para carga indutiva

A simulação com carga indutiva utilizou um motor de indução de 0,5 CV, 220 V, 1,9 A, 60 Hz, IV polos como carga com os parâmetros: $R_s = 17,64 \Omega$, $R_r = 8,43 \Omega$, $L_s = 25 \text{ mH}$, $L_r = 25 \text{ mH}$ e $L_m = 707 \text{ mH}$, por fase conectados em Y. Os resultados das formas de onda de tensão são mostrados na Figura 4.18.

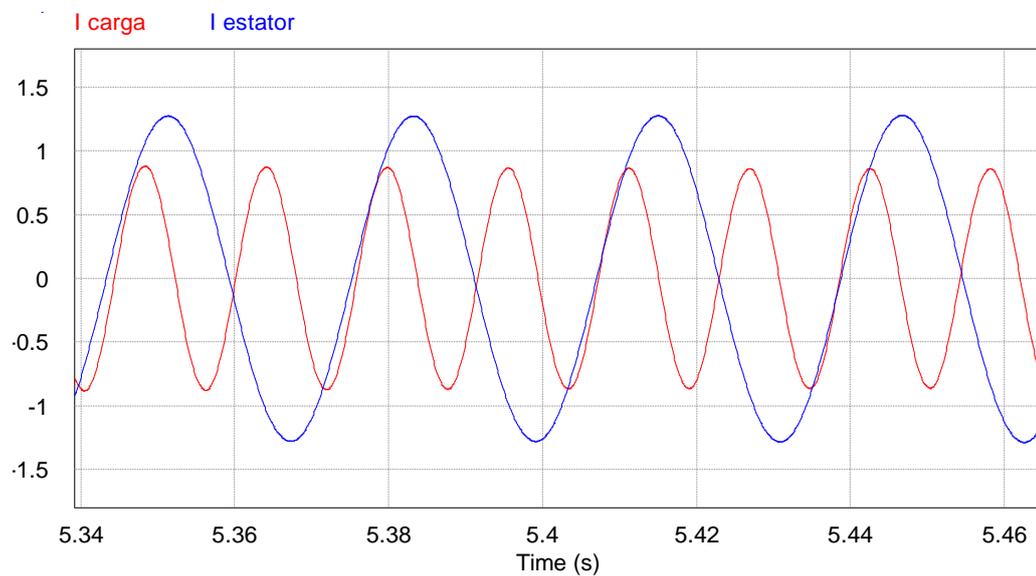
A tensão de saída em ambas as máquinas foi de 321 V para a máquina 1 e 195 V para a máquina 2 para uma velocidade de 1020 rpm. Após a conexão da carga indutivas, estes valores caíram para 143 V na máquina 1 e 84,3 V na máquina 2 numa velocidade de 971 rpm, conforme ilustra a Figura 4.18. Durante a simulação, a carga foi conectada no instante de 5 segundos.

Figura 4.18 — Tensão de linha na saída das máquinas e rotação



Fonte: Autor.

Figura 4.19 — Corrente na carga e no estator da máquina 2



Fonte: Autor.

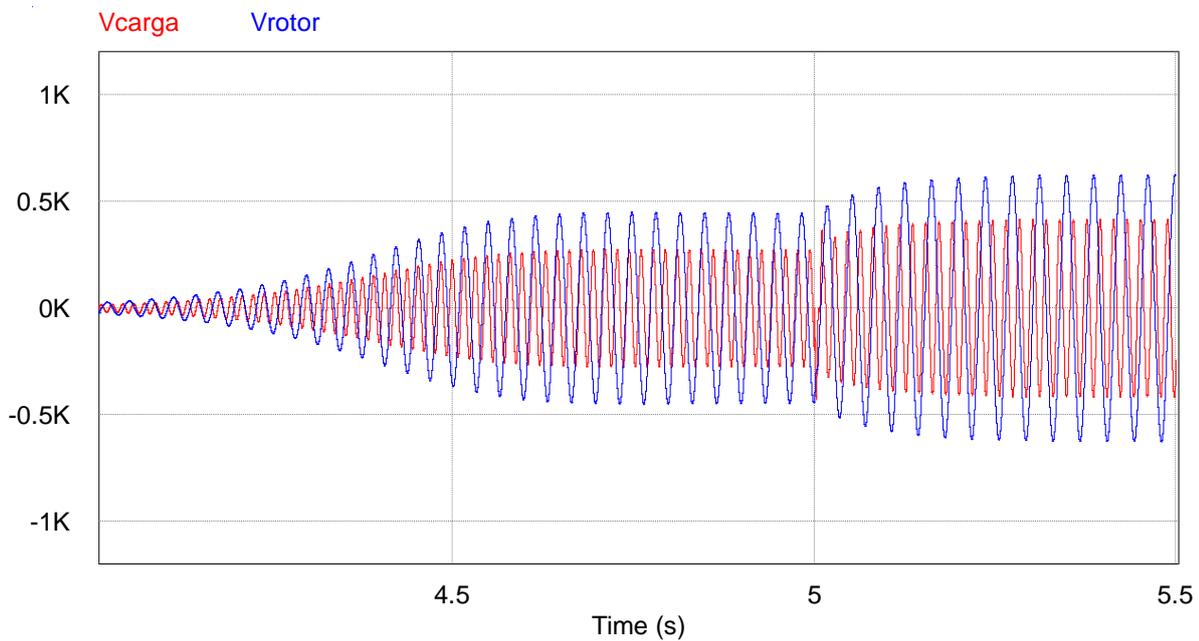
Nas formas de onda da Figura 4.19, as correntes eficazes do estator da máquina 2 e na carga são respectivamente de 0,902 A e 0, 614 A e as frequências são de 29 Hz e 58 Hz.

4.3.3 Resultados de simulação para carga capacitiva

Para a simulação com carga reativa capacitiva utilizou-se um banco de capacitores com 60 μF por fase conectados em Y. As formas de onda de tensão são mostradas na Figura 4.20.

A tensão de linha na saída dos geradores é de 318 V no estator e 195 V na carga. Após a conexão da carga capacitiva, as tensões passam a ser de 443 V e 293 V, respectivamente. A velocidade inicia em 1018 rpm e passa para 811 rpm.

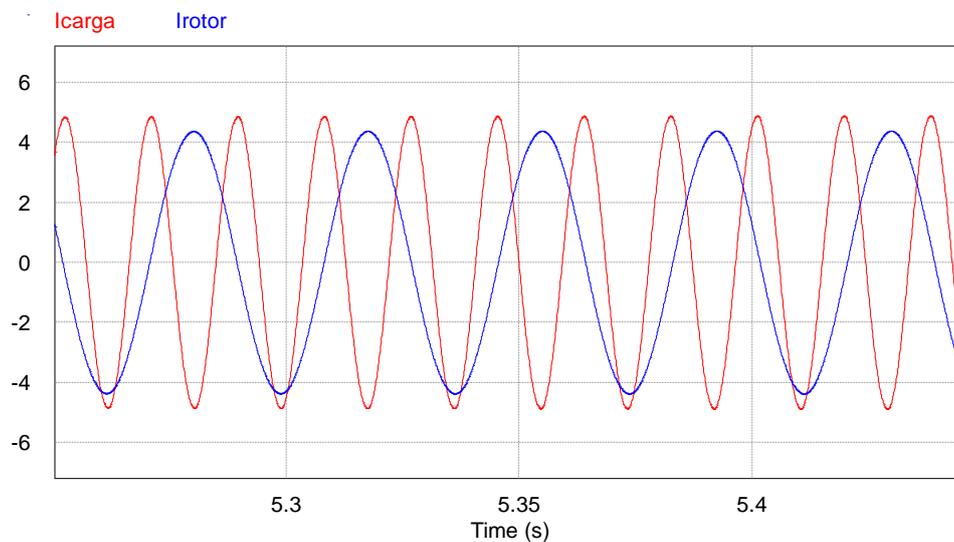
Figura 4.20 — Tensão de saída nas máquinas com carga capacitiva



Fonte: Autor.

Na Figura 4.21, a corrente eficaz usada na carga é de 3,05 A e na máquina 2 é de 3,44 A.

Figura 4.21 — Tensão e corrente de saída nas máquinas com carga capacitiva



Fonte: Autor.

4.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

As simulações contidas neste capítulo ilustram que é possível duplicar a frequência elétrica, a qual é gerada em qualquer tipo de máquina sincronizada mecanicamente, implementada em oposição de campo e acionada por um eixo de rotor comum. Também foi observado nos testes que a variação da velocidade do eixo influencia proporcionalmente a frequência gerada em uma das máquinas. Por exemplo, uma máquina síncrona tem sua frequência duplicada em relação à frequência da outra, sendo que na máquina de indução resulta uma tensão de frequência duplicada aplicada à carga.

Os modelos de turbinas eólicas utilizados nas simulações deste trabalho são os disponíveis no PSIM®. Esses modelos são capazes de fornecer as condições básicas para uma aproximação de uma situação real.

Os resultados obtidos nas simulações e na experimentação para tensão e corrente, quando alimentada uma carga com a energia fornecida por geradores multiplicadores de frequência, são apresentados neste capítulo. Comprova-se que a frequência duplicada é capaz de alimentar cargas trifásicas com diferentes características mantendo assim a mesma eficácia de uma fonte de energia convencional.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA MÁQUINAS SINCRONIZADAS MECANICAMENTE

Este capítulo apresenta os resultados práticos de laboratório para as máquinas acopladas mecanicamente obedecendo as condições impostas nas simulações apresentadas no capítulo anterior.

5.1 DUPLICAÇÃO DE FREQUÊNCIA NA CARGA

Uma vez verificada a duplicação de frequência nas simulações teóricas das máquinas elétricas, como mostrado na seção anterior, foi feita uma montagem prática para simular todo o sistema. Essa montagem considerou uma máquina síncrona e uma máquina de indução com quatro polos cada. A Figura 5.1 mostra as condições da montagem no laboratório usando um motor de 2 kW DC como máquina principal para substituir a turbina eólica acoplada a uma máquina síncrona e de indução de eixo comum. Esse acoplamento mecânico permitiu a operação dos geradores nas mesmas condições teoricamente simuladas.

Figura 5.1 — Montagem de laboratório de geradores sincronizados mecanicamente

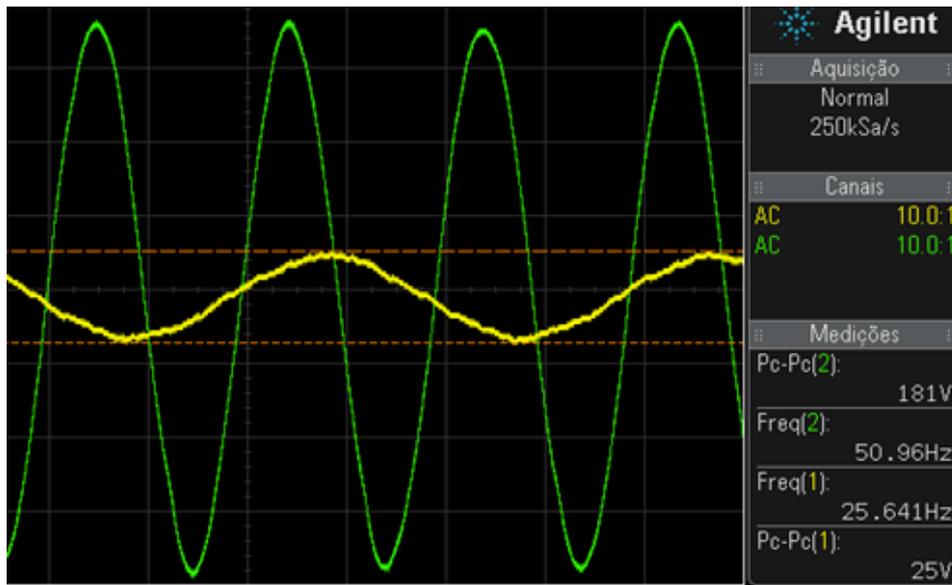


Fonte: Autor.

É importante enfatizar que, para comparar os resultados teóricos e práticos, foram utilizadas as mesmas duas condições de velocidade estabelecidas para os motores para aproximar a frequência padrão da rede pública. Nestes testes de laboratório, as formas de onda de entrada e saída foram obtidas para uma fase de um gerador de indução trifásico com rotor

bobinado a 770 rpm. Uma frequência de entrada de 25,45 Hz foi registrada para uma frequência de 50,90 Hz na carga de saída, como as formas de onda mostradas na Figura 5.2.

Figura 5.2 — Formas de onda de entrada e saída obtidas em laboratório para uma das fases do gerador de indução com rotor bobinado (770 rpm - 50,90 Hz)



Fonte: Autor.

As medições de dados sob diferentes velocidades do eixo impostas às máquinas elétricas foram obtidas a partir de multímetros digitais, como mostrado na Tabela 5.1, independentemente da carga conectada nos terminais da máquina de indução elétrica. Na Figura 5.3 são visualizadas as formas de onda de entrada e saída para uma fase do gerador de indução trifásico de rotor bobinado, agora a uma velocidade de 914 rpm, frequência de entrada de 30,3 Hz, carga de saída a 60,6 Hz e uma tensão pico a pico de 175 V.

É importante enfatizar que o eixo de uma turbina eólica tem velocidades variáveis o tempo todo de acordo com a velocidade do vento e as mudanças de carga. Para atender a uma frequência de carga constante sob cada velocidade de vento e condições de carga diferentes foi necessário fazer um ajuste contínuo através da relação da caixa de engrenagens, do ângulo de ataque da turbina ou/e da tensão de campo da máquina síncrona. Essas ações garantem a frequência e a tensão desejadas na carga. Em uma montagem como a proposta nesta dissertação existem dois sincronismos independentes: o acionamento mecânico comum do eixo dos geradores e a frequência elétrica da rede pública. Tais condições da montagem podem ter algumas dificuldades quando as máquinas forem conectadas à rede pública.

Tabela 5.1 — Valores práticos de teste para diferentes velocidades da turbina

V_{dc} campo	V_{ac} gerador	I_{ac} rotor	f (Hz) rotor	V_{ac} (V) carga	I carga (A)	f (Hz) carga	Velocidade rpm
28	8,8	3,64	25,6	65	0,55	50,9	770
51	8,2	3,18	30,3	62	0,61	60,6	914

Fonte: Autor.

Figura 5.3 — Formas de onda de entrada e saída obtidas em laboratório para uma das fases do gerador de indução com rotor bobinado (914 rpm – 60,60 Hz)



Fonte: Autor.

Como visto nos testes simulados, a frequência da tensão gerada resultante para uma determinada velocidade aplicada ao rotor bobinado é adicionada à velocidade comum do eixo. Essa frequência é exatamente o dobro da frequência gerada pela velocidade imposta pela turbina eólica no eixo comum do rotor.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA GERADORES COM DIFERENTES NÚMEROS DE POLOS

Para comprovar os resultados simulados no laboratório foi realizada uma conexão entre as duas máquinas, como mostra a Figura 5.4. Nesses testes foi simulado um gerador eólico utilizando com a principal máquina para acionar ambos os geradores um motor DC com potência nominal de 2 kW e respectivamente com tensão e corrente da armadura 170V/15A, respectivamente tensão e corrente do campo 180V/1,1A. Máquinas assíncronas com dois, quatro, seis e oito polos, respectivamente, que foram acoplados à máquina principal. A máquina 2 é um motor de indução de rotor bobinado de quatro polos. O acoplamento mecânico possibilitou a execução das condições práticas muito próximas das simuladas. A velocidade do eixo n comum aos dois geradores acoplados mecanicamente foi lida em um tacômetro calibrado a rpm durante testes de laboratório. Foi utilizado um banco de capacitores de excitação com valores muito próximos aos calculados. Depois que as máquinas atingiram a velocidade nominal e geraram a tensão nos terminais do gerador 1, uma chave seccionadora foi acionada no enrolamento do estator do gerador de energia 2. Esse gerador, por sua vez, alimentou uma carga resistiva conectada em estrela de 250 ohms por fase. Quatro velocidades diferentes foram usadas de acordo com o número de polos do gerador 1.

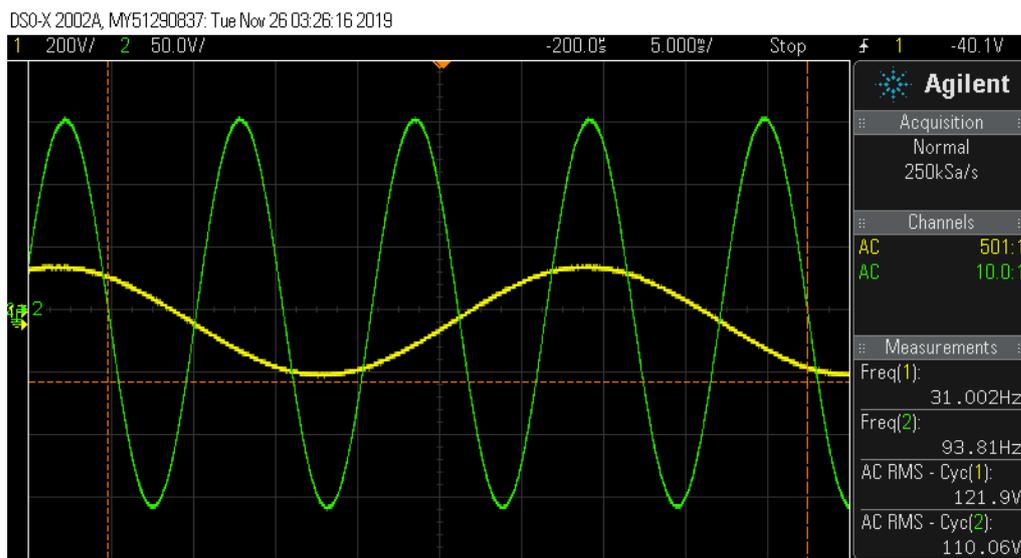
Figura 5.4 — Montagem em laboratório para simular dois geradores sincronizados mecanicamente



5.2.1 Resultados experimentais para os geradores com 2x4 polos

A configuração prática com geradores de dois e quatro polos resultou nas formas de onda mostradas na Figura 5.5, onde as frequências registradas foram 31 Hz e 93,77 Hz, respectivamente com tensões de 121,9 V e 110,08 V. A rotação deste teste foi de 1890 rpm.

Figura 5.5 — Formas de onda de tensão em máquinas com 2x4 polos



Fonte: Autor.

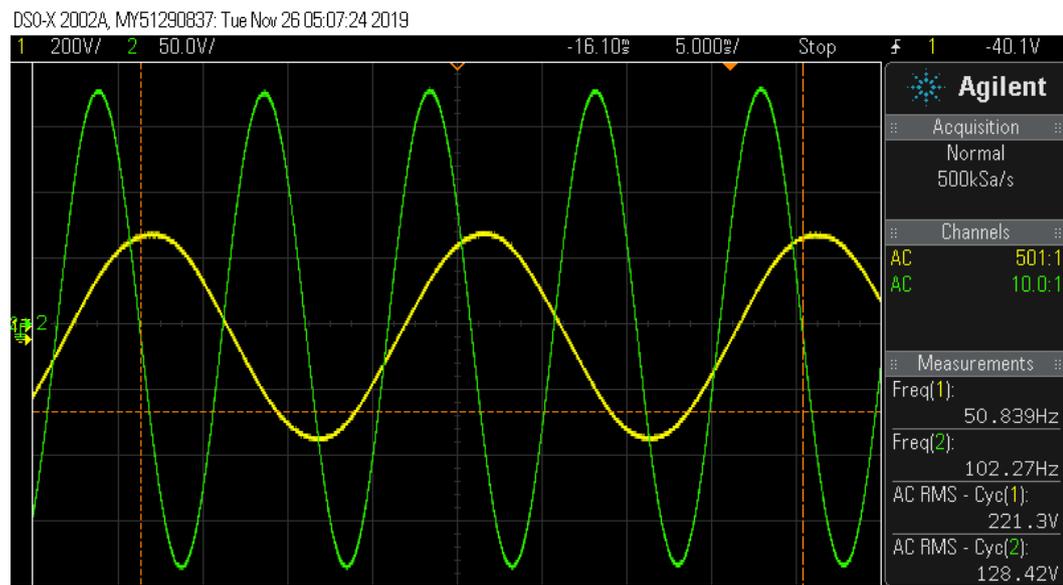
5.2.2 Resultados experimentais para os geradores com 4x4 polos

As formas de onda na combinação de polos 4x4 são mostradas na Figura 5.6, onde a frequência da máquina 1 foi de 50,83 Hz e a tensão 221,3 V e da máquina 2, as frequências 102,27 Hz e o teste de tensão de 128,42 V com velocidade de 1548 rpm.

5.2.3 Resultado experimental dos geradores com 6x8 polos

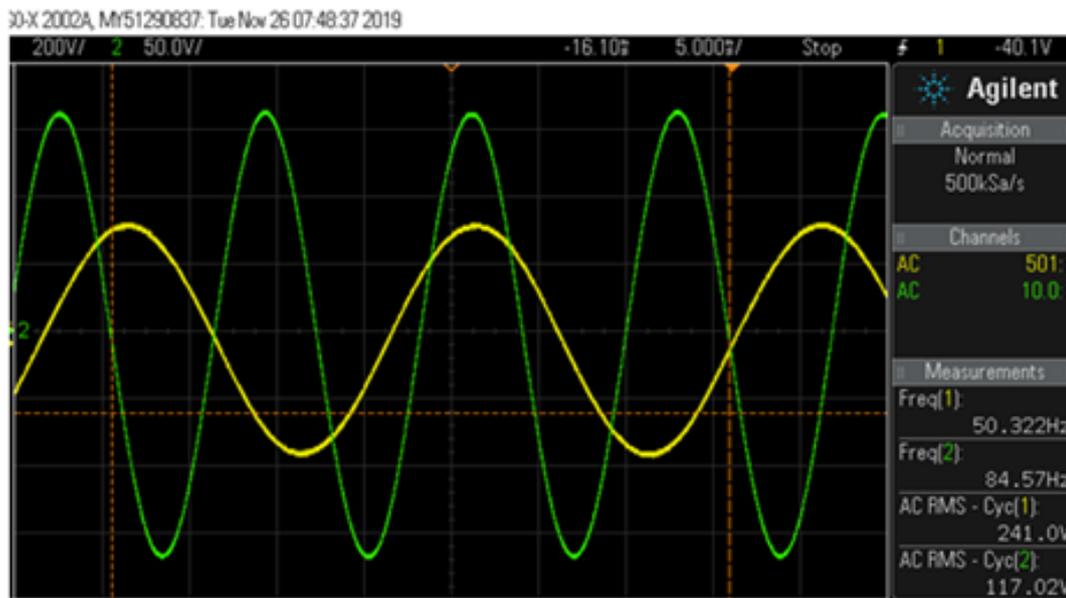
A Figura 5.7 mostra os resultados do gerador 1 conectado para operar com 6 polos. A frequência da máquina 1 foi de 50,32 Hz e a tensão 241 V. Na máquina 2, a frequência era de 84,57 Hz e a tensão era de 117 V. A velocidade deste teste era de 1037 rpm.

Figura 5.6 — Formas de onda da tensão em máquinas com 4x4 polos



Fonte: Autor.

Figura 5.7 — Formas de onda de tensão em máquinas com 6x4 polos

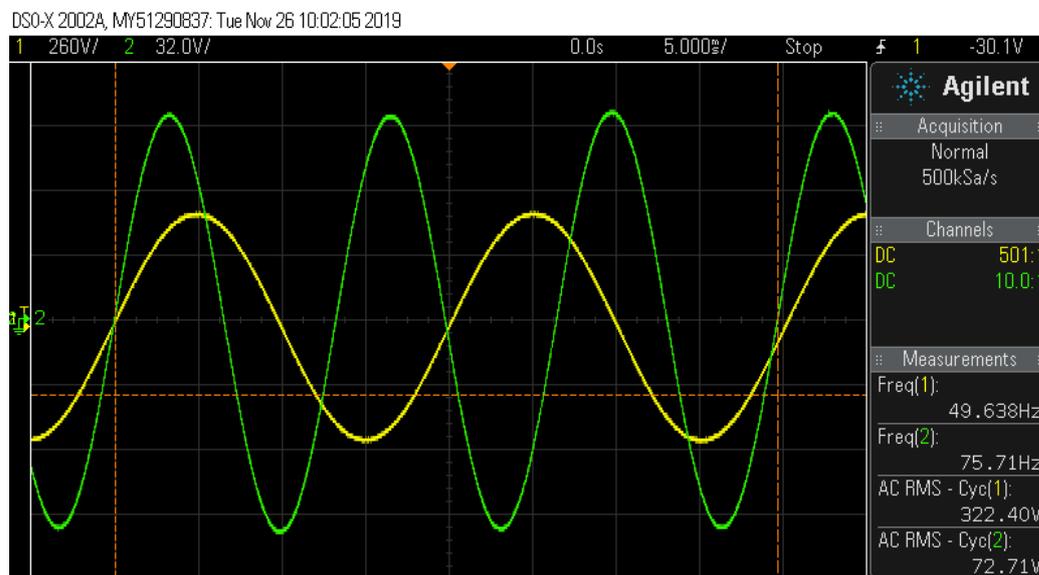


Fonte: Autor.

5.2.4 Resultado experimental dos geradores com 8x4 polos

As formas de onda para a combinação de polos 8x4 são mostradas na Figura 5.8, onde a frequência registrada para a máquina 1 foi de 49,63 Hz e uma tensão de 322,4 V. Na máquina 2, a frequência foi de 75,71 Hz e a tensão era de 72,71 V. A velocidade dessa o teste foi de 740 rpm. Para este teste, foi necessário alterar a conexão do estator de um enrolamento de duas séries para uma estrela em série na máquina 2 para que o valor nominal da potência do gerador 1 não fosse excedido.

Figura 5.8 — Resultados laboratoriais para máquinas de 8x4 polos



Fonte: Autor.

Nos resultados dos testes de laboratório apresentados acima é possível observar algumas diferenças entre os dados teóricos e os dados práticos para determinados valores de tensão. Isso se deve às características consideradas das máquinas e aos parâmetros de simulação que melhor os aproximaram da prática. Procurou-se tomar todo o cuidado ao se considerar as condições operacionais das fontes e equipamentos de medição, mas mesmo assim estas diferenças aparecem.

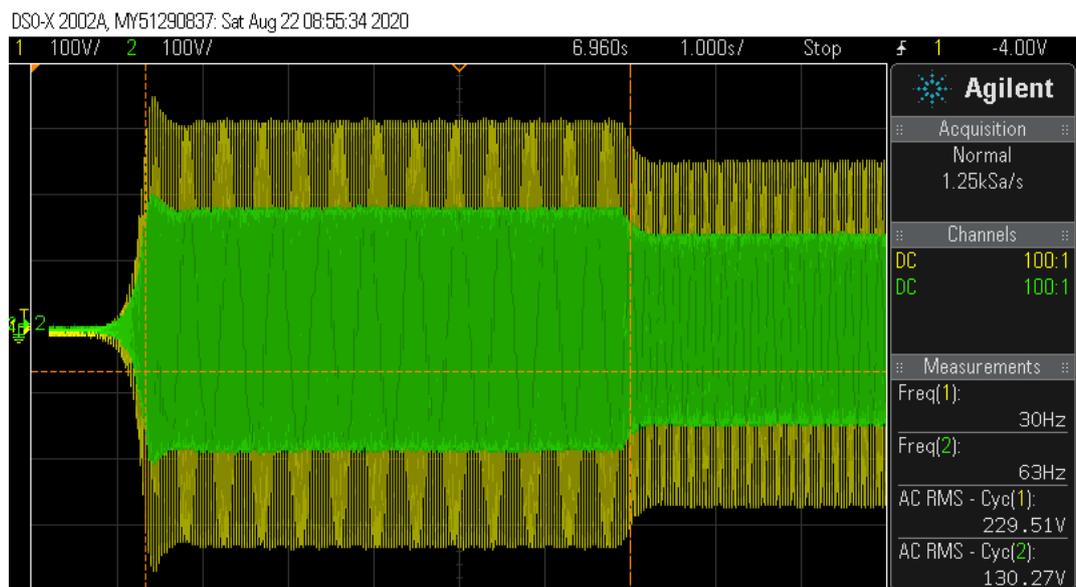
5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA DIFERENTES CARGAS

Esta secção avalia os comportamentos da tensão e da corrente que podem ser fornecidas por geradores com multiplicador mecânico de frequência quando conectados a uma carga isolada. Durante os testes de laboratório foi utilizado um motor DC como máquina principal para simular o acionamento de ambos os geradores com potência nominal de 2 kW, tensão e corrente da armadura 170V/15A e tensão e corrente do campo de 180V/1,1A. Para a máquina acionadora (máquina 1) foi usado um motor assíncrono do tipo gaiola. A máquina 2 foi um motor de indução de rotor bobinado, ambas as máquinas com quatro polos. Os dados de placa e os parâmetros para as duas máquinas de indução são mostrados no capítulo.

5.3.1 Resultados experimentais para carga resistiva trifásica

Na Figura 5.9 é possível observar a queda de tensão provocada no momento da conexão da carga resistiva. A tensão de linha inicialmente é de 130,27 V com o conjunto numa rotação de 900 rpm. Após o fechamento da chave, a tensão de linha sob a carga foi de 87,5 V e 862 rpm. As frequências mantêm-se duplicadas, apenas com uma diminuição em função da velocidade. Observa-se a mesma frequência para as amplitudes de tensão e corrente, além das formas de onda estarem em fase, conforme mostra a Figura 5.10.

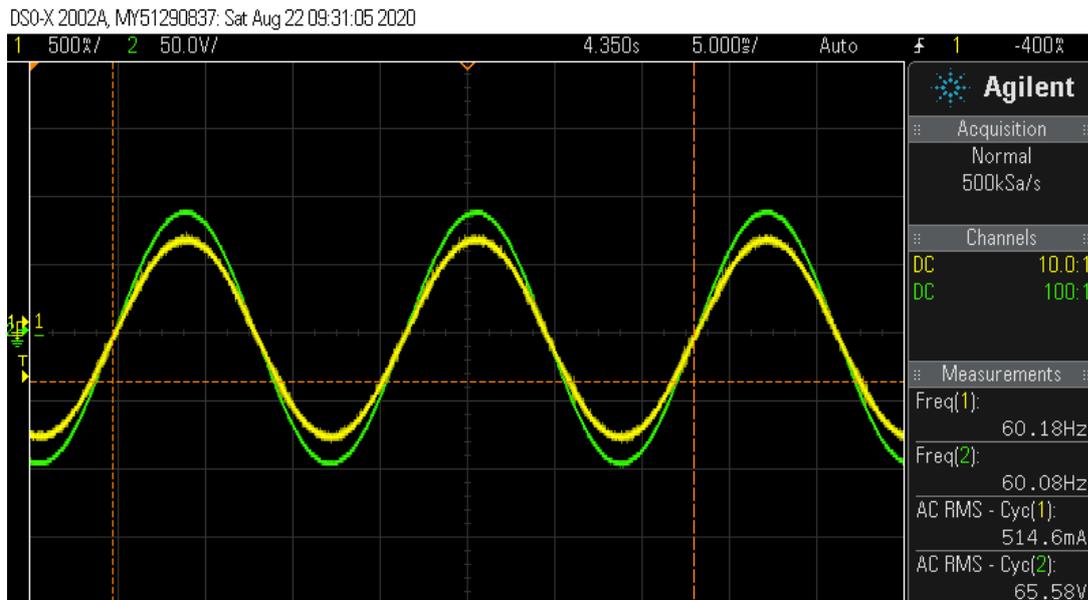
Figura 5.9 — Tensão na saída das máquinas alimentando uma carga resistiva



A Figura 5.9 ilustra as formas de onda de tensão na entrada da máquina 2 com a cor amarela e a saída para a carga o gráfico está na cor verde.

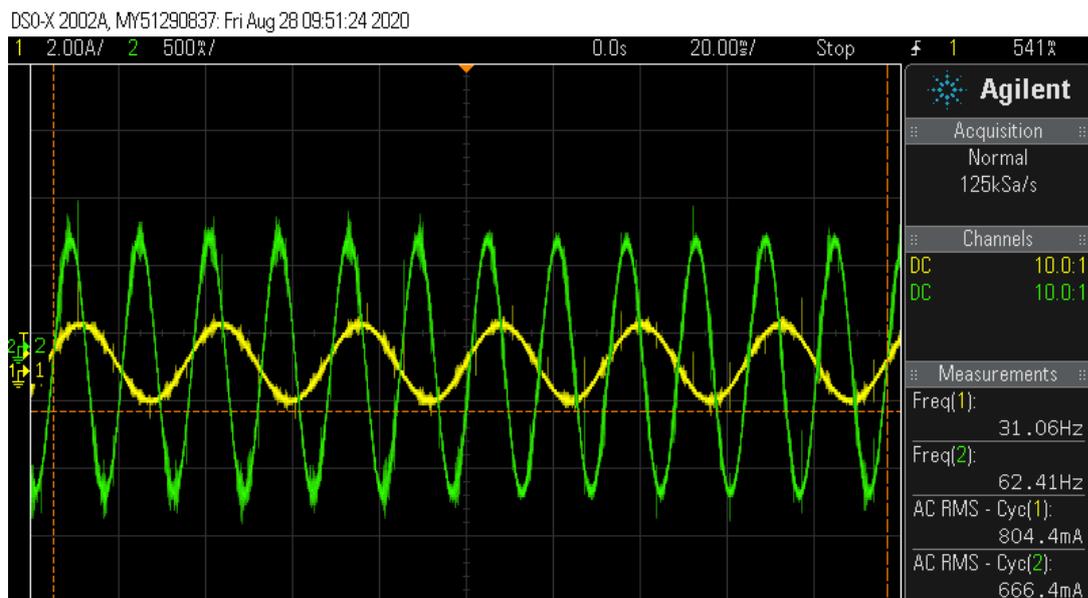
A Figura 5.11 mostra as correntes de entrada e saída da máquina 2. As frequências são de 31 Hz e 62,4 Hz respectivamente.

Figura 5.10 — Tensão e corrente na carga resistiva



Fonte: Autor.

Figura 5.11 — Formas de onda de corrente de estator e rotor da máquina 2

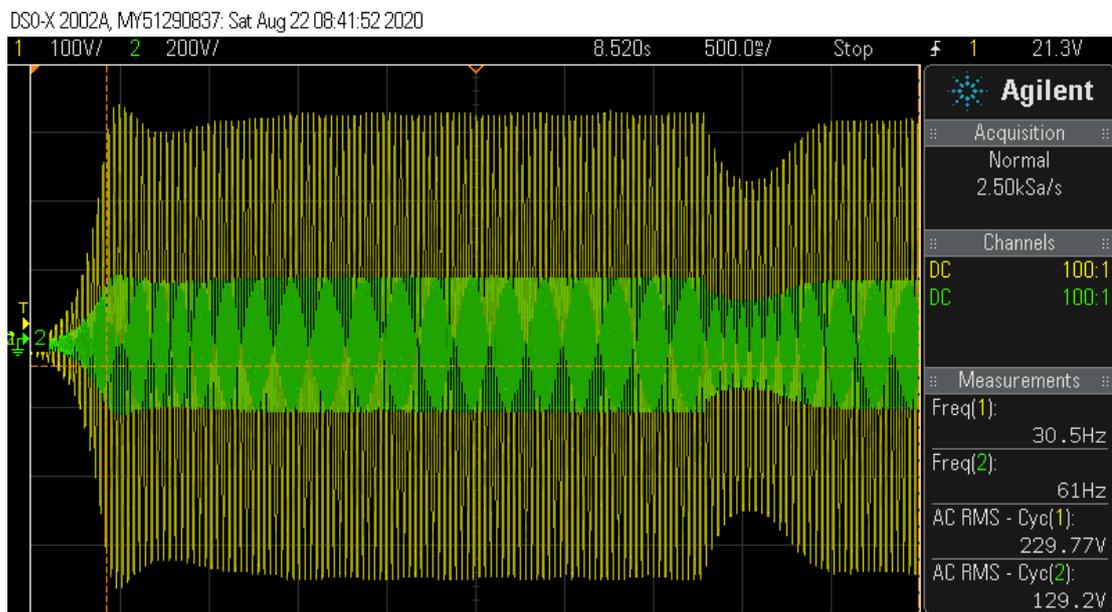


Fonte: Autor.

5.3.2 Resultados experimentais para carga indutiva

Na Figura 5.12 é observada a queda de tensão seguida de um afundamento durante a conexão da carga indutiva. A tensão inicialmente é de 130,27 V de linha com velocidade de 900 rpm, após o fechamento da chave a tensão de linha sob a carga é de 87,5 V e 862 rpm. As frequências mantêm-se duplicadas, apenas com uma diminuição em função da velocidade.

Figura 5.12 — Tensão em ambas as máquinas para carga indutiva



Fonte: Autor.

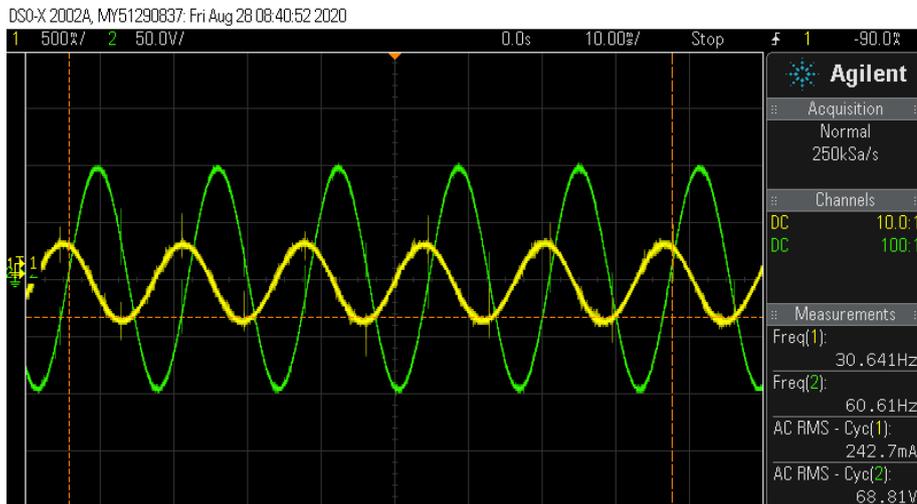
A Figura 5.13 mostra as formas de onda de tensão e corrente em uma das fases da carga indutiva que são respectivamente 68,8 V e 0,24 A. A defasagem entre as formas de onda de corrente é de 90° em atraso e a frequência se mantém duplicada.

É possível observar-se uma diferença entre as formas de onda teórica e prática. Isto se deve a possíveis diferenças entre parâmetros reais e teóricos, além do efeito da inércia da carga indutiva usada nos testes práticos.

A Figura 5.14 mostra as formas de onda da corrente na entrada da máquina 2 e na saída para a carga. As frequências de entrada e saída são de 28,2 Hz e 59,2 Hz, respectivamente. Observa-se que a corrente no estator da máquina 2 é de 0,576 A e na carga é de 0,47 A. Este

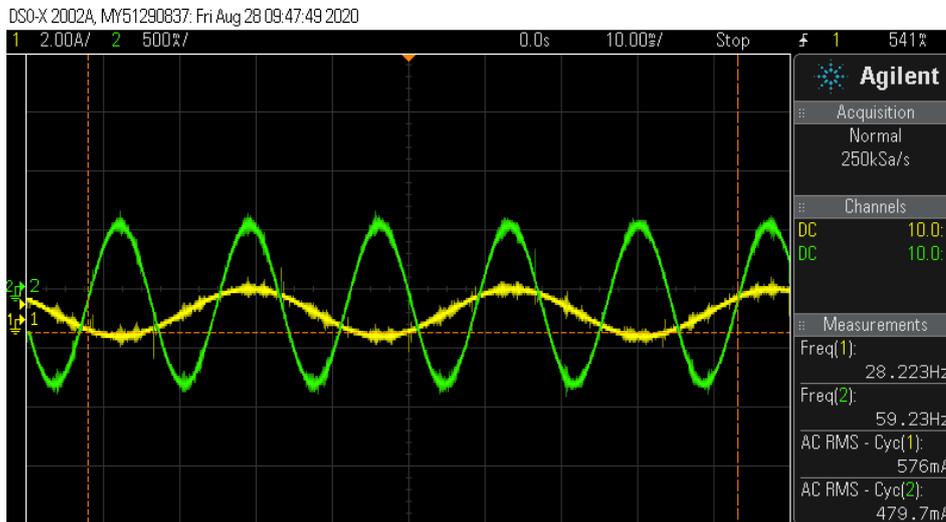
aumento de corrente no estator é característico da carga indutiva alimentada pelo gerador de indução. Foi utilizada a conexão Δ na carga para a medição das correntes na Figura 5.14;

Figura 5.13 — Tensão e corrente em uma fase da carga indutiva



Fonte: Autor.

Figura 5.14 — Forma de onda de corrente de entrada e saída na máquina 2



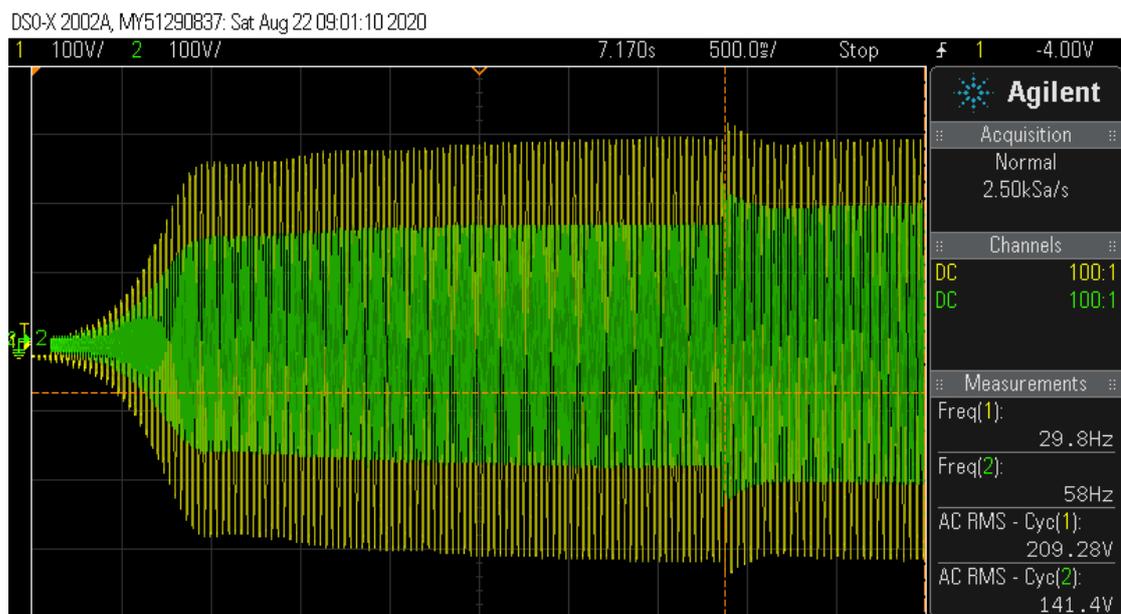
Fonte: Autor.

5.3.3 Resultados experimentais para carga capacitiva

A Figura 5.15 representa a elevação de tensão no instante da conexão da carga indutiva. A tensão inicialmente é de 141 V de linha com as máquinas a uma velocidade de 967 rpm. Após o fechamento da chave, a tensão de linha na carga é de 154,7 V a uma velocidade de rotação de 916 rpm. A tensão gerada pela máquina 1 mantém-se a praticamente constante mesmo com a elevação da tensão na saída da máquina 2. As frequências mantêm-se duplicadas, apenas com uma diminuição da velocidade em função da carga.

Na Figura 5.16 são ilustradas as formas de onda de tensão e corrente de linha na carga, além da corrente estar adiantada em relação a tensão.

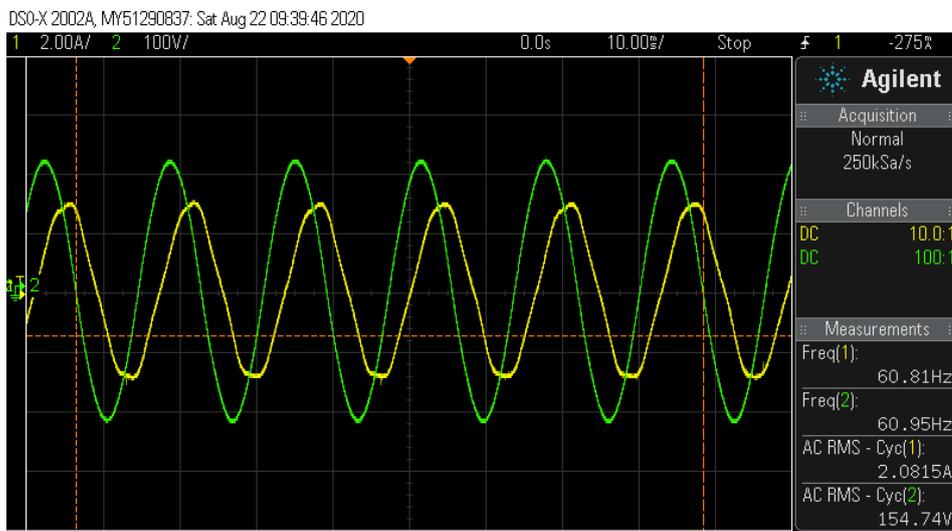
Figura 5.15 — Tensão na saída das máquinas com carga capacitiva



Fonte: Autor.

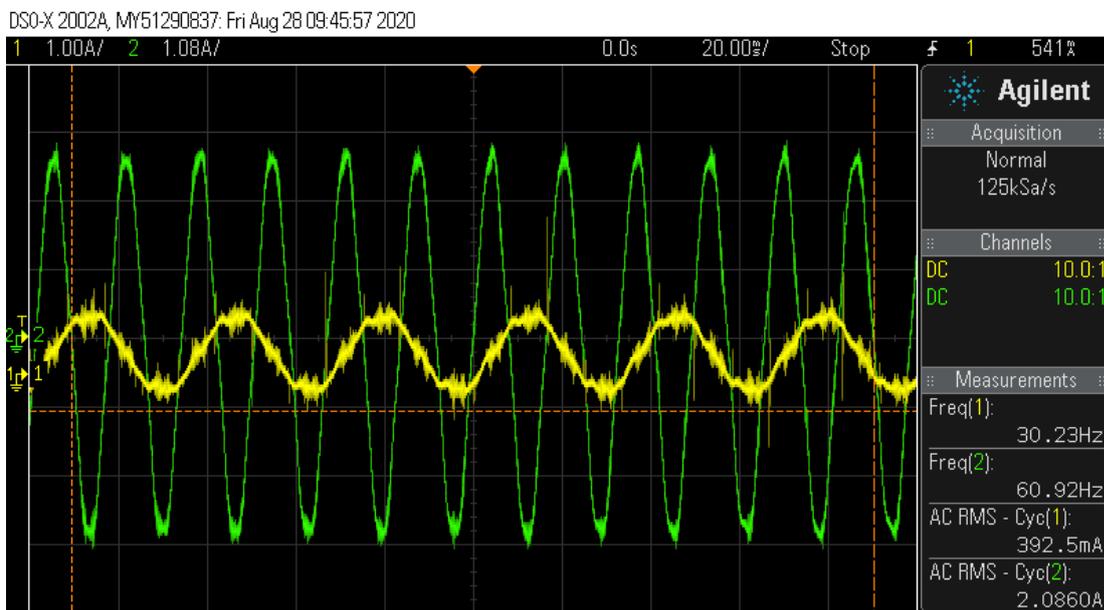
A Figura 5.17 ilustra as formas de onda da corrente na entrada da máquina 2 e na saída para a carga. As frequências de entrada e de saída são de 30,2 Hz e 60,9 Hz, respectivamente. Observa-se que a corrente no estator da máquina 2 é de 0,39 A e na carga é de 2,08 A.

Figura 5.16 — Tensão e corrente de linha na carga capacitiva



Fonte: Autor.

Figura 5.17 — Correntes no estator e na saída do rotor da máquina 2 para carga capacitiva



Fonte: Autor.

Apesar da corrente de carga ser próxima da corrente nominal do rotor, a corrente no estator mantém-se em 0,39 A. Neste caso há uma circulação de corrente entre a carga capacitiva e a reatância indutiva do rotor.

5.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM GERADORES CONECTADOS A REDE DA CONCESSIONÁRIA

Nesta seção descreve-se a conexão dos geradores acoplados mecanicamente com a rede elétrica pública. Para isso, a frequência elétrica de saída na máquina 2 deverá ser compatível e sincronizada com a frequência da concessionária.

A análise da operação de geradores em paralelo com a rede de distribuição é de suma importância para a operação de micro usinas interligadas em qualquer sistema elétrico. Cabe aqui ressaltar que não é o objetivo deste experimento analisar o paralelismo entre geradores. Ainda mais, neste tipo de operação conectada à rede de distribuição as máquinas podem operar muito próximo de sua carga máxima fornecendo o máximo de rendimento. Para uma redução de carga, algumas unidades foram desligadas e as restantes continuaram operando com rendimento elevado, implicando numa operação econômica da geração de energia (SANTOS, 2010).

Na experiência descrita nesta seção utilizou-se o mesmo conjunto de máquinas utilizado na operação com carga isolada. O banco de capacitores da montagem prática é o mesmo calculado para uma carga máxima de 370 W, ou seja, com 100 μF por fase conectados em Y. A montagem realizada no laboratório é mostrada na Figura 5.19, onde observam-se os instrumentos necessários para as medições e também a chave de sincronismo instalada junto às lâmpadas para ajuste do sincronismo e aplicação do método proposto nesta dissertação.

Na Figura 5.18, é possível visualizar a máquina CC, acoplada as máquinas de indução de rotor gaiola e bobinado. As máquinas de indução são conectadas ao transformador e a saída deste ligada na chave de sincronismo. Na saída do sincronismo são conectados a carga (MIT) e a rede.

a) Condições de paralelismo

As condições para se conectar o gerador mecanicamente sincronizado em paralelo com a rede foram:

- mesma forma de onda;
- mesmo valor eficaz;
- mesma frequência;
- nas máquinas polifásicas a sequência de fases das tensões polifásicas do gerador que se conecta à rede deve ser a mesma do barramento.

Figura 5.18 — Montagem em laboratório para conexão dos geradores sincronizados mecanicamente em paralelo com a rede



Fonte: Autor.

b) Métodos de sincronização

Os métodos usados para sincronizar geradores são:

- Lâmpadas acesas e apagadas;
- Sincronoscópio;
- Relé digital de sincronismo.

Dentre os métodos citados acima, o método das “lâmpadas acesas e apagadas” é utilizado neste experimento. Tal montagem com as lâmpadas e chave de sincronismo em laboratório usa um método simples e confiável para indicar qual o sentido da sequência de cada fase do gerador e da rede.

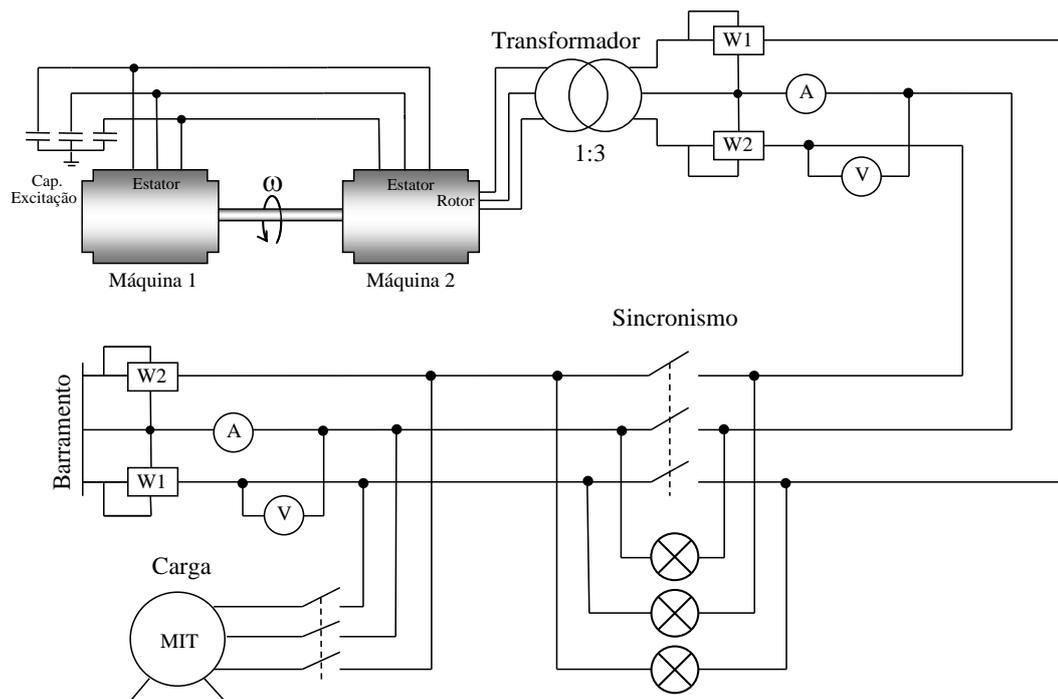
5.4.1 Execução do experimento

Para mostrar a sincronização mecânica de máquinas elétricas operando em paralelo com a rede foi efetuada a montagem da Figura 5.19 com a chave de paralelismo aberta na qual já está montado o fogo-girante, verificando-se mesma sequência de fases, mesma tensão e mesma frequência. Deve se atuar na velocidade dos geradores para se obter um nível de tensão eficaz

e frequência compatíveis com a da rede. Após verificar as condições necessárias para o paralelismo, no momento apropriado foi acionada a chave de conexão.

Um exemplo do diagrama esquemático da sincronização mecânica de máquinas elétricas operando em paralelo com a rede é mostrado na Figura 5.19, usando uma máquina de indução (MI) do tipo gaiola e uma (MI) com rotor bobinado. Ambas as máquinas são acopladas por um eixo comum de tal forma que têm velocidades opostas uma a outra. A montagem em laboratório ainda utiliza um motor CC como fonte primária. Esta montagem prática consiste em conectar os geradores sincronizados mecanicamente em paralelo com a concessionária alimentando uma MIT. Para tal foram usados instrumentos para medição de tensão, frequência, corrente, potência ativa, tanto para o gerador como para a concessionária.

Figura 5.19 — Diagrama elétrico de montagem para a conexão com a rede



Fonte: Autor.

O diagrama da Figura 5.19 representa um transformador trifásico de 1,32 kVA e 60 Hz numa relação (1:3) na saída da máquina 2 para elevar a tensão ao nível da tensão do barramento comum.

5.4.2 Análise da distribuição de potência

Normalmente, a análise da distribuição de potências considerou-se: a componente ativa e a reativa, as quais são alteradas nos testes por atuação na potência fornecida ao eixo. Isto resulta em potência ativa nos terminais da máquina ou na excitação, isto é potência reativa, respectivamente.

Para atuar na potência reativa fornecida pelo gerador foi necessário alterar os valores correspondentes à corrente de excitação. Esta corrente atua diretamente na tensão nos terminais da máquina o que não é possível para um gerador de indução com banco de capacitores fixo. Para a potência ativa fornecida pelo gerador é necessário que haja um aumento na energia mecânica fornecida ao eixo da máquina 1. Isto equivale a aumentar a vazão pela turbina que a aciona para poder atuar na velocidade da máquina CC (primária).

A medida de potência foi realizada usando dois wattímetros, P1 e P2. Supondo que a carga permaneça inalterada quando se alteram as condições de fornecimento ativo e reativo, altera-se P1 e P2. Porém a soma $P1' + P2'$ (novas potências ativas fornecidas), deverá permanecer constante, isto é, se P1 aumentar, P2 diminuir e vice-versa. O mesmo ocorre com a componente reativa. Para analisar a contribuição de potência dos geradores conectados ao barramento, foram preenchidas as etapas mostradas na Tabela 5.2.

A Tabela 5.3 registra as grandezas de tensão e corrente, bem como a velocidade dos geradores durante as cinco etapas analisadas.

Na primeira etapa, a potência consumida pela carga (MIT) foi de 95,6 W, alimentada apenas pelo barramento. Os geradores estão entre ligados, porém desconectados e operando a vazio com velocidade de 923 rpm. A frequência de saída na máquina 2 é de 63 Hz para uma tensão de linha de 380 V eficaz, conforme mostra a Figura 5.20.

Verificadas as condições básicas necessárias, o paralelismo foi efetuado. Nesta segunda etapa o gerador passou a operar em paralelo com o barramento numa velocidade de 906 rpm. A potência no lado dos geradores é praticamente próxima de zero, mas a potência ativa do barramento é de 155 W. Ocorre uma pequena circulação de corrente entre barramento/geradores ocasionando esse aumento de potência ativa total de barramento. Os valores de tensão e frequência na saída da máquina 2 são, respectivamente de 390 V e 60 Hz, conforme mostra a Figura 5.21.

Tabela 5.2 — Distribuição de potência entre geradores e barramento

Etapa	Contribuição para Alimentação da Carga	Barramento					Gerador				
		W1	W2	WT	IL	COS ϕ	W1	W2	WT	IL	COS ϕ
1ª	Só barramento alimentando o MIT sem carga.	-106	214	95,6	0,81	0,17	0	0	0	0,0	0
2ª	Alternador em // porém "Flutuando".	-141	251	155	1,05	0,23	-37	37	0	0,12	0,0
3ª	Potências divididas entre Barramento e gerador	-183	240	43	1,0	0,05	-22	77	55	0,22	0,34
4ª	Fazer com que o Gerador forneça a potência ativa necessária	-270	223	-47	1,09	0,04	-6	126	120	0,35	0,5
5ª	Gerador fornecendo potência máxima	-416	190	-226	1,53	0,24	29	316	345	0,87	0,59

Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2010).

Na terceira etapa variou-se a velocidade dos geradores, fazendo com que as duas fontes dividam a potência consumida pela carga. Nesta condição, o barramento forneceu 43 W para o MIT e os geradores contribuíram com uma potência de 55 W na velocidade de 908 rpm. Observa-se na tabela 5.2 um acréscimo nas correntes de estator da máquina 1 e de rotor da máquina 2.

Na quarta etapa, a velocidade das máquinas foi ajustada em 909 rpm afim de fornecer a potência ativa necessária à carga. A potência registrada no lado dos geradores foi de 120 W e no lado do barramento foi de -47 W. O sinal negativo indica a potência transferida para o barramento com a inversão do fluxo de potência.

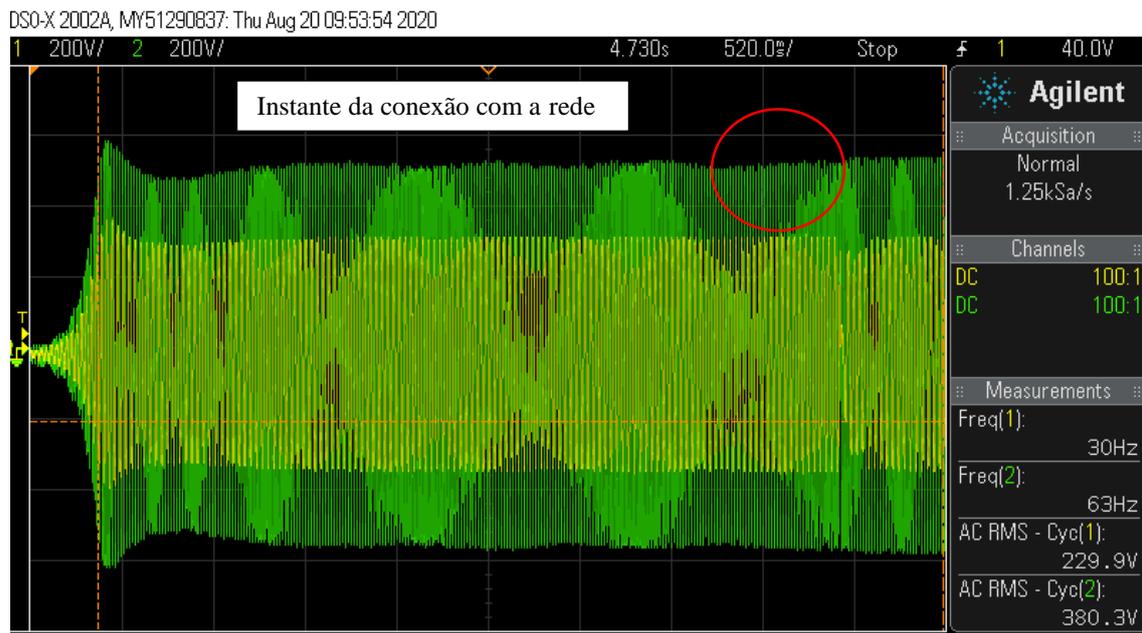
A análise do fluxo de potência entre geradores e barramento é consolidada na quinta etapa quando se impôs a velocidade na máquina primária afim de se extrair a potência máxima dos geradores. Nesta situação, a velocidade dos geradores foi de 915 rpm e a potência total fornecida foi de 345 W. Para o barramento foi transferida uma potência de -226 W. A outra parcela de 119 W é transferida para a carga. Observa-se na Tabela 5.3 que a corrente no estator da máquina 1 e de rotor da máquina 2 foram, respectivamente de 2,26 A e 2,57 A. Estes níveis já estão acima da corrente máxima dos enrolamentos das máquinas. A velocidade nominal da máquina de indução foi de 1730 rpm sendo que neste experimento a mesma operou a uma velocidade de aproximadamente 914 rpm.

Tabela 5.3 — Grandezas entre máquina 1 e máquina 2 durante as etapas

Etapa	Máquina 1			Máquina 2				Velocidade rpm
	V _{ac} estator	I _{ac} estator	f (Hz)	V _{ac} estator	I _{ac} estator	V _{ac} rotor	I _{ac} rotor	
1 a	230,6	1,77	30,4	230,6	0,17	128	0,17	923
2 a	228,4	1,8	29,7	228,4	0,33	129	0,66	906
3 a	230,4	1,96	29,7	230,4	0,58	131	0,9	908
4 a	229,5	1,88	29,7	229	0,63	130	1,41	909
5 a	231,5	2,26	29,5	230,4	0,67	132	2,57	915

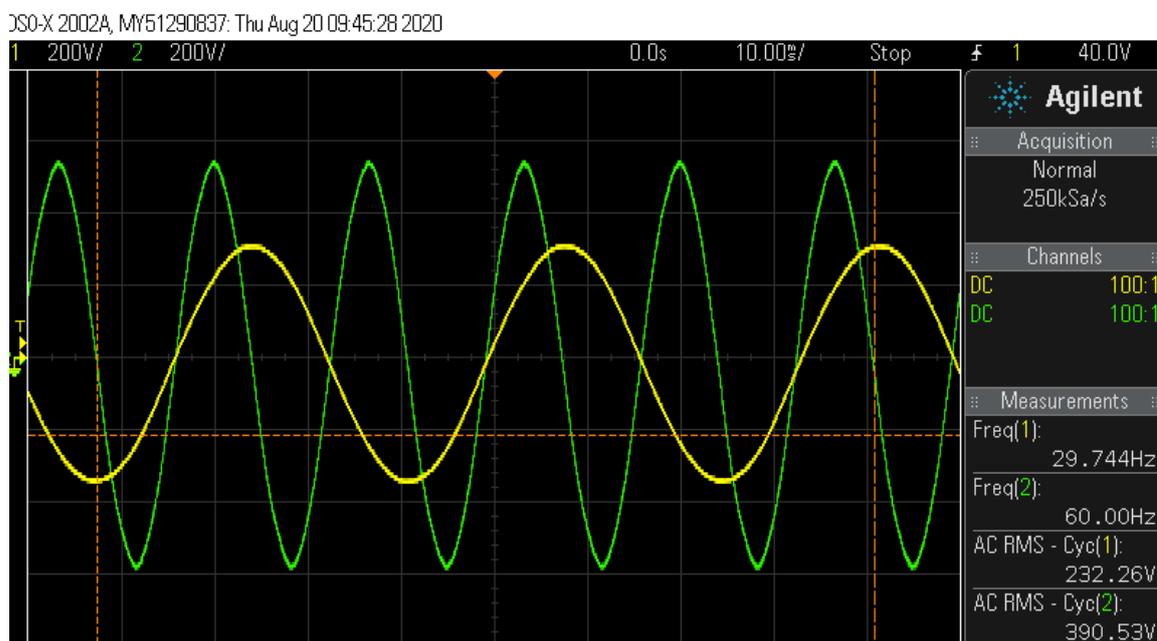
Fonte: Autor.

Figura 5.20 — Tensão nas máquinas no instante do paralelismo



Fonte: Autor.

Figura 5.21 — Tensão de estator e rotor na máquina 2 durante o paralelismo



Fonte: Autor.

Durante os ensaios se tomou cuidado para não se ultrapassar os limites de corrente e tensão das máquinas para evitar possíveis danos as mesmas, considerando que a potência máxima da máquina 2 foi de 0,37 kW.

5.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Os resultados obtidos nos testes apresentados provam que é possível conectar uma fonte primária, como energia eólica ou hidrelétrica, para acionar um conjunto gerador-turbina conectado a qualquer tipo de gerador elétrico. Eles devem ter os enrolamentos conectados numa sequência inversa de fase para poder dobrar a frequência de saída. Observa-se também que há dificuldade de sincronismo com a rede pública. O qual é resultado dos sincronismos individuais, elétricos e mecânicos, independentes entre as máquinas que geram eletricidade local e na rede pública.

Nos testes práticos apresentados neste capítulo, é possível observar algumas diferenças entre os dados teóricos e os dados práticos para determinados valores de tensão. Isso se deve às características consideradas das máquinas e aos parâmetros de simulação que melhor os aproximaram na prática. Deve-se tomar cuidado ao considerar as condições operacionais das fontes e equipamentos de medição.

Para consolidar a utilização dos geradores investigados com frequência duplicada ou multiplicada em sua saída, foi realizada a conexão destas máquinas em paralelo com a rede conforme os procedimentos necessários. Os geradores são os mesmos dos experimentos com carga isolada. Os ensaios foram realizados com diferentes velocidades impostas na máquina primária para coletar os dados referentes as grandezas elétricas. Os resultados obtidos estabelecem que os geradores são capazes de fornecer potência ativa para a rede operando com metade da rotação nominal das máquinas. Deve-se observar que houveram algumas diferenças entre as simulações e as experiências laboratoriais devido a imprecisão dos instrumentos e que, podem ocorrer nas medições de fluxo de potência.

6 CONCLUSÕES

Com a necessidade de se aumentar o rendimento de máquinas elétricas, a sincronização mecânica de duas máquinas, multiplicando a frequência para alimentar uma carga, mostra-se uma alternativa interessante. Esta técnica pode melhorar em muito as alternativas limpas para geração de energia elétrica, usando máquinas rotativas convencionais como as energias eólica e hidráulica. Desta forma, esta Dissertação de Mestrado teve como objetivo principal investigar a possibilidade de se sincronizar mecanicamente dois geradores elétricos de forma compacta acoplados em turbinas eólicas ou de fluxo de água, visando aumentar a frequência elétrica na tensão de carga.

Mostrou-se nesta dissertação que a sincronização mecânica de duas máquinas ligadas em contra fase podem duplicar a frequência elétrica gerada por qualquer tipo de máquina elétrica sincronizada mecanicamente, implementada em oposição de campo e acionada por um eixo de rotor comum. Também foi observado nos testes e simulações que a variação da velocidade do eixo influencia proporcionalmente a frequência gerada em um par de máquinas. Por exemplo, uma máquina síncrona tem sua frequência duplicada em relação à frequência da máquina acionadora.

Os resultados obtidos nos testes apresentados provam que é possível conectar uma fonte primária, tal como aquela advinda de energia eólica ou hidrelétrica para acionar um conjunto turbina-gerador para acionar um gerador síncrono, assíncrono e de ímãs permanentes. Eles devem ter os enrolamentos conectados em contra fase para que se possa dobrar a frequência de saída deste conjunto. Quando a máquina não for de indução, observa-se há dificuldade de sincronismo com a rede pública resultante dos sincronismos individuais, elétricos e mecânicos, independentes entre as máquinas que geram eletricidade local e na rede pública.

Mostra-se que a frequência de saída pode ser multiplicada, conforme o modelo proposto, para diversas combinações de máquinas elétricas com diferentes números de polos, de enrolamentos e de fases. A frequência resultante é uma forma prática, estável e eficiente para aumentar a frequência do gerador a partir do vento ou do hidráulico com geradores acionados por turbinas sujeitas a baixas velocidades do fluxo primário. Este multiplicador de frequência mecânico ajuda a: 1) reduzir a taxa de velocidade dos multiplicadores de rotação; 2) reduzir a frequência de comutação dos conversores eletrônicos de potência com reflexos em sua vida útil. Note-se que a máquina síncrona, ou ainda de indução e de ímãs permanentes podem ser utilizadas como excitatriz. A máquina secundária (gerador 2) que atende a carga elétrica.

Para consolidar a utilização dos geradores investigados e obter frequência duplicada ou multiplicada em sua saída realizaram-se a conexão máquinas em paralelo com a rede conforme os procedimentos necessários. Os resultados práticos comprovaram que os geradores são capazes de fornecer potência ativa para a rede operando com velocidade abaixo da rotação nominal das máquinas.

Os resultados obtidos nestes experimentos são de fundamental importância para o projeto de uma máquina única capaz de multiplicar a frequência na saída de seus terminais. Ainda é possível projetar duas máquinas sincronizadas mecanicamente levando em consideração uma melhor combinação de máquinas. Por exemplo, combinando a alta eficiência do gerador PMSG sincronizado com gerador de rotor bobinado pode obter grandes vantagens sobre outras combinações de máquinas.

Outra vantagem dessa configuração de máquinas é não precisar absorver energia reativa da rede para sua corrente de magnetização. A operação em paralelo com a rede é a mais adequada, requerendo apenas dispositivos de proteção e desligamento em caso de inversão do fluxo de potência. Na operação isolada dos geradores, esta técnica poderá ser usada para a regulação de velocidade e tensão durante oscilações ou, ainda, poderá alimentar uma carga fixa em casos que hajam variações de tensão.

6.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes tópicos podem ser sugeridos como propostas para trabalhos futuros:

- Sincronização mecânica de duas máquinas elétricas operando em paralelo com a rede pública usando máquinas de menor potência para excitar o campo da máquina 2 de carga.
- Verificação do comportamento e das limitações da combinação da máquina de indução com rotor bobinado com outros tipos de geradores, por exemplo, geradores PMSG, Síncrono, Brushless, etc.;
- Desenvolvimento de um sistema de controle para as variações de tensão e frequência desta configuração de máquinas;
- Estudo da configuração híbrida de máquinas acopladas mecanicamente operando em paralelo com a rede de distribuição quando a frequência de geração for muito menor que a da rede com um inversor fazendo a conexão, de forma a se ter um máximo aproveitamento de energia.

6.2 PUBLICAÇÕES

(Publicado) F.A. Farret, **M.B. Gasparin**, Increase of Load Frequency Using Mechanically Synchronized Generators in Rotating Opposition. Em: Congresso Innovative Smart Grid Technologies, Gramado, RS – Brasil, 2019.

REFERÊNCIAS

ALTINO, L. M. **Máquinas Síncronas: teoria e aplicações**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 1984.

ASMINE, M. et al. Model Validation for Wind Turbine Generator Models. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 26, n. 3, p. 1769–1782, ago. 2011.

AYAZ, M.; COLAK, I.; BAYINDIR, R. **Matlab/gui based wind turbine generator types on smart grid systems**. 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). **Anais...IEEE**, nov. 2016, Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7884514/>>

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamentos uma introdução**. Elsevier, p. 608, 2018.

BLOOMBERG, N. E. F. **New Energy Outlook 2015** - Long-term projections of the global energy sector. Bloomberg New Energy and Finance, p. 8, 2015.

BRIHMAT, F.; MEKHTOUB, S. **Dynamic response of a stand alone DC side wind energy conversion system with battery energy storage**. Energy Procedia, v. 50, n. 1, p. 97–104, 2014.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 684 p.

CHIMURKAR, P.; KOTHAVADE, P. **A review of different power converter topologies for PMSGs wind turbine**. 2016 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). **Anais...IEEE**, out. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7889987/>>

COSTA, P. S. **Modelagem E Controle Do Conversor Dab Para Interface Entre Banco De Baterias E Sistema Elétrico De Potência**. 2017. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

DEHGHANZADEH A, BEHJAT V, B. M. **Double input Z-source inverter applicable in dual-star PMSG based wind turbine**: Elsevier Enhanced Reader.pdf, 2016.

DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro, 1994.

ECP. **www.ecowavepower.com**, 2020. Disponível em: <<https://www.ecowavepower.com/>>

EL ACHKAR, M. et al. Generic study of the power capability of a cascaded doubly fed induction machine. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 86, p. 61–70, mar. 2017.

EPE. **Balanco Energético Nacional Empresa de Pesquisa Energética - EPE (Brasil)**, 2018. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>

FARRET, F. A. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica**. 2°. ed. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2010. 244 p.

FARRET, F. A.; GASPARIN, M. B. **Increase of Load Frequency Using Mechanically Synchronized Generators in Rotating Opposition**. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America). **Anais...set**. 2019

FARRET, F. A.; SIMÕES, M. G. **Integration of Renewable Sources of Energy**. 2nd. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2017. p. 688.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C; UMANS, S D. **Máquinas Elétricas: com introdução a eletrônica de potência**. 6 ed. São Paulo: Bookman, 2008. 648 p.

GUMEROVA, M. B.; BABIKOVA, N. L.; GAREEV, R. I. **The cascade synchronous-asynchronous motor**. 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). **Anais...IEEE**, out. 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8949946/>>

GWEC. **International Trade Association for Wind Power Industry. Statistics**, 2019. Disponível em: <<https://gwec.net/global-wind-report-2019/>>

HAN, S. et al. **Parameter matching method for single-mode modular cascade machines systems**. 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). **Anais...IEEE**, ago. 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8080836/>>

HESLA, T. J. Electrification of a Major Steel Mill Part 5: Scherbius and Kraemer Drives [History]. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 13, n. 4, p. 8–11, jul. 2007.

HU, J.; ZHU, J.; DORRELL, D. G. A New Control Method of Cascaded Brushless Doubly Fed Induction Generators Using Direct Power Control. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 29, n. 3, p. 771–779, set. 2014.

IEA. **Key World Energy Statistics 2016**, 2016. Disponível em: <<https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2016/09/KeyWorld2016.pdf>>

INERGIAL. **Descentralização, descarbonização e digitalização: a transformação do setor de distribuição de energia elétrica Brasileiro**. Disponível em: <<https://inergial.com.br/>>.

JOHNSON, G. L. **Wind Energy Systems** Electronic ed. Manhattan: 2006.

JOHNSON, K. E. et al. **STANDARD AND ADAPTIVE TECHNIQUES FOR MAXIMIZING ENERGY CAPTURE**. n. June, p. 70–81, 2006.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 11° edição ed. GLOBO. São Paulo: 1995. 667 p.

KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; SUDHOFF, S. D. **Analysis of Electric Machinery**, Mc Graw-Hill Book Co.; 1° ed. , 1986.

PATIN, N.; MONMASSON, E.; LOUIS, J.-P. **Modeling and Control of a Cascaded Doubly Fed Induction Generator Dedicated to Isolated Grids**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 56, n. 10, p. 4207–4219, out. 2009.

PE. **Portal Energia Renováveis**, 2020. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/>>

PETERSSON, A. **Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines**. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY: Göteborg, 2003.

REIS, L. B. DOS. **Geração de Energia Elétrica**. 2. Edição ed. Barueri, São Paulo: Manoele, 2013. 460 p.

SALLES, M. B. **Modelagem E Análises De Geradores Eólicos De Velocidade Variável Conectados Em Sistemas De Energia Elétrica**. 2009. 124 f. Tese (Doutorado Engenharia Elétrica)- Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.

SANTOS, M. M. **Notas de aula de Conversão Eletromecânica de Energia 1**. In: UNIUI (Ed.). Ijuí: [s.n.]. p. 22.

SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. **Modeling and Analysis with Induction Generators**. 3rd ed.; CRC Press, 2015. 468 p.

SIMONE, G. A. **Máquinas de Indução Trifásicas: Teoria e Exercícios**. 1º Edição ed. São Paulo: Saraiva, 2000. 328 P.

TAN, K.; ISLAM, S. **Optimum Control Strategies In Energy Conversion Of PMSG Wind Turbine System Without Mechanical Sensors**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 19, n. 2, p. 392–399, 2004.

WANG, C. et al. **Doubly-Fed Wind Turbine Mathematical Model and Simulation**. 2014 International Symposium on Computer, Consumer and Control. **Anais...IEEE**, jun. 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6846002/>>

WILDI, T. **Electrical Machines, Drives, and Power Systems** 5th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 886 p.

XU, L. et al. **Design and control of a high-efficiency Doubly-Fed Brushless machine for wind power generator application**. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. **Anais...IEEE**, set. 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5617911/>>

YARAMASU, V. et al. **High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-Of-The-Art And Emerging Technologies**. Proceedings of the IEEE, v. 103, n. 5, p. 740–788, maio 2015.

ZHANG, Q. et al. **Mid-Long Term Optimal Dispatching Method Of Power System With Large-Scale Wind-Photovoltaic-Hydro Power Generation**. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). **Anais...IEEE**, nov. 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8245290/>>

APÊNDICE A — FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E NÃO RENOVÁVEIS NO PANORAMA ENERGÉTICO

O desenvolvimento econômico da sociedade, nos dias atuais, é diretamente dependente da energia elétrica, principalmente nos países em desenvolvimento. Contudo, garantir o fornecimento de energia elétrica frente ao crescimento desordenado do consumo passa a ser o grande desafio do planejamento da infraestrutura de geração. Momentos de crescimento econômico seguidos de períodos de recessão tornam esse cenário incerto.

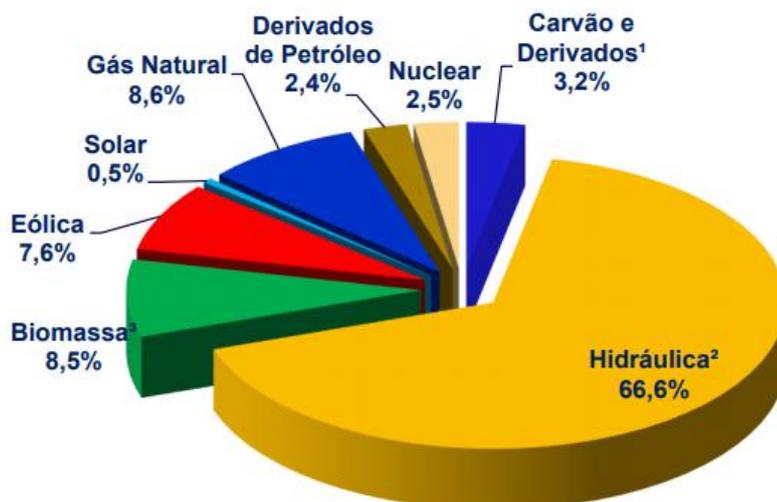
Atualmente, grande parte da energia elétrica gerada é oriunda das fontes primárias de energia extraídas diretamente da natureza, ou seja, água, vento, sol, combustíveis fósseis, onde se destacam a energia hidráulica, o gás natural, carvão mineral, petróleo, urânio e a biomassa. Outras fontes primárias utilizadas para geração são a energia eólica, a energia solar, energia geotérmica e a energia das marés (PE, 2020).

As fontes renováveis de energia são aquelas em que a sua utilização pode-se manter e ser aproveitada ao longo do tempo sem possibilidade de esgotamento, exemplos deste tipo de fonte são a energia eólica e solar. Por outro lado, as fontes de energias não renováveis têm recursos teoricamente limitados, sendo que esse limite depende dos recursos existentes no nosso planeta, como é o exemplo dos combustíveis fósseis (REIS, 2011).

Com o crescimento da economia global, a geração de energia elétrica atualmente representa um desafio significativo para atender uma crescente demanda e ao mesmo tempo reduzir as emissões de carbono. Referente à produção de energia elétrica, ainda há uma grande participação de fontes não renováveis na planta energética mundial. Em termos gerais, 5% da energia elétrica provém de fontes nucleares, 10% de fontes renováveis e os outros 90% de uma divisão quase uniforme entre petróleo, carvão e gás natural. Dos 10% das fontes renováveis, dois terços são de hidrelétricas sendo o terceiro restante composto pelas fontes eólica, solar e biomassa (GWEC, 2019).

O Brasil dispõe de uma matriz energética baseada na geração de energia elétrica com fontes primárias e renováveis, especialmente por meio de suas usinas hidroelétricas, biomassa e eólica, as quais chegam a corresponder até a 82,7% de toda energia elétrica gerada. Porém a matriz também possui fontes de geração à base dos combustíveis fósseis como o gás natural (8,6%), carvão mineral (3,2%) e derivados de petróleo (2,4%) como pode ser visto na Figura A.1 (EPE, 2018).

Figura A.1 — Geração de Energia Elétrica por Fonte no Brasil – (participação em 2018)



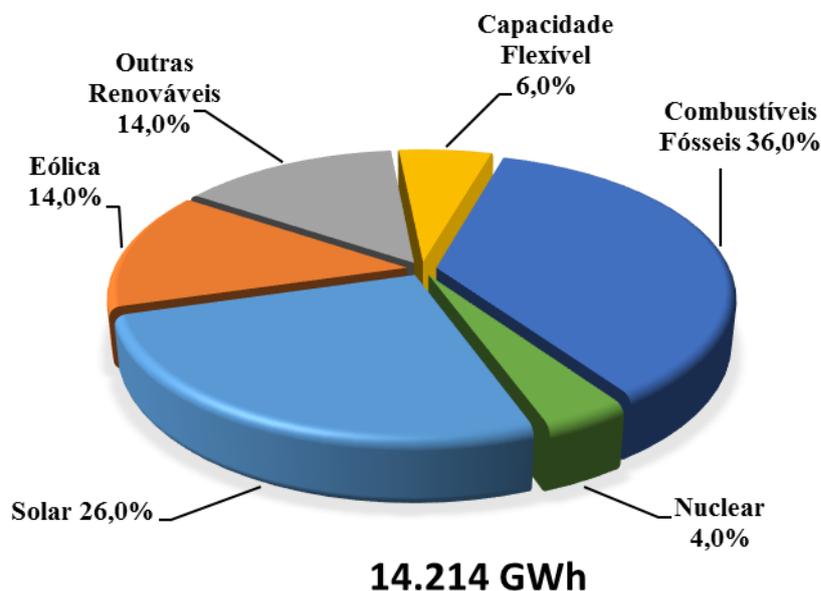
Fonte: (EPE, 2018).

Por outro lado, a tendência para o futuro é que a geração de energia elétrica através de combustíveis fósseis seja reduzida ou até eliminada. A escassez de sua matéria prima aumentará devido à diminuição de suas reservas. Diante disso a tendência é que a inserção das energias renováveis chegue a 54 % do total da energia elétrica produzida no mundo em 2040, com a energia solar e a energia eólica contribuindo com 40 % desta geração (BLOOMBERG, 2015). A Figura A.2 demonstra uma previsão da matriz energética mundial em 2040. Note-se que o crescimento da oferta da energia elétrica através das fontes renováveis de geração é dependente dos custos e do desempenho destas tecnologias disponíveis comercialmente.

Considerando que os fatores que afetam significativamente novos projetos, estes devem sujeitar-se a análises criteriosas das regiões ainda na fase de projeto em termos de tecnologia, localização geográfica e regulamentações. Mesmo assim, muitas vezes, mesmo as estimativas mais cuidadosas inviabilizam os custos para instalação de alguns projetos.

Com novos desafios e incertezas na implementação de novos parques de geração de energia renovável, alguns estudos como os da (IEA, 2016) apresentam que a quota das energias renováveis na geração total de energia elétrica aumentará de 21% em 2012 para 33% em 2040, com estas fontes fornecendo em torno de metade da geração mundial de eletricidade (COSTA, 2017).

Figura A.2 — Expectativa para capacidade instalada global em 2040



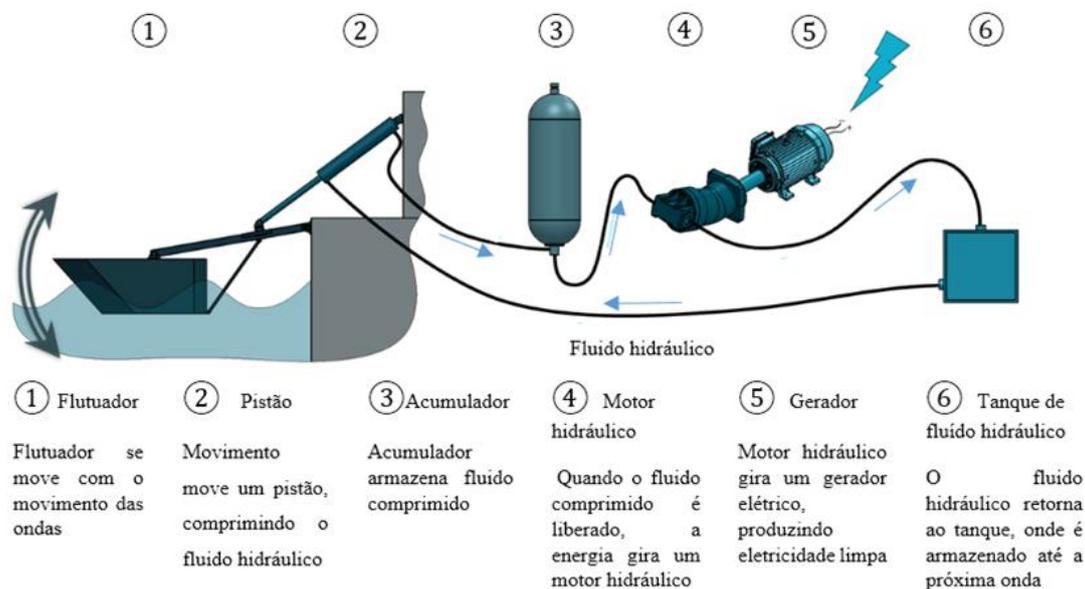
Fonte: Fonte: (COSTA, 2017).

Atualmente a principal fonte de energia utilizada é o petróleo mesmo sendo uma energia não renovável e a principal responsável pelo efeito estufa. Tal fato provoca uma disputa por vários países, onde muitos destes são dependentes desta fonte de energia.

A ideia em tornar-se independente do petróleo e a diminuição do aquecimento global faz com que as energias renováveis sejam as mais abordadas em projetos; para isso é necessário que haja a produção e criação de novas tecnologias, redução nos custos de aquisição e criação de políticas públicas (COSTA, 2017).

Disponíveis em vários tipos, as fontes renováveis de energia estão em constante avanço tecnológico e novas formas de se produzir energia elétrica a partir delas são descobertas utilizando como fontes os recursos naturais, como por exemplo, da recente inovação no desenvolvimento de um hidrogerador onde seu princípio é semelhante ao de um aerogerador. A diferença é que o movimento das pás ao invés de ser impulsionado pelo vento ele é impulsionado por correntes marítimas conforme ilustrado na Figura A.3 (ECP, 2020). O movimento dos flutuadores comprime e descomprime pistões hidráulicos que transmitem fluido hidráulico biodegradável para acumuladores localizados na terra. A pressão acontece nos acumuladores e é capaz de girar um motor hidráulico que fica acoplado ao gerador elétrico ligado à rede pública através de um inversor eletrônico de potência. Após a descompressão, o fluido volta para o tanque de fluido hidráulico, onde é reutilizado pelos pistões, criando um sistema circular fechado. A produção de eletricidade neste processo se inicia com ondas a partir de 0,5 metros de altura (PE, 2020).

Figura A.3 — Configuração básica de um hidrogerador



Fonte: Adaptado de (ECP, 2020).

Conforme o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) os oceanos possuem potencialmente o dobro da quantidade de energia que o mundo produz hoje e a produção potencial de energia global a partir de ondas é estimada em 29.500 TWh de eletricidade (PE, 2020). Ainda a International Renewable Energy Agency (IRENA) estima que, usando apenas 2% dos 800.000 quilômetros de costa do mundo que excedem uma densidade de energia das ondas de 30 kW/m, o potencial técnico global para energia das ondas é de cerca de 500 GW de energia elétrica, com base em uma eficiência de conversão de 40% (PE, 2020).

Outras tecnologias que vêm ganhando destaque no cenário nacional e mundial são a inovação dos painéis fotovoltaicos com maior eficiência e com novos sistemas de arrefecimento e movimentação aumentando a produção em 20%. O caso das telhas solares se tornar uma realidade e precisa apenas superar o desafio de integrar uma célula solar em uma telha, com vida útil estimada em 30 anos e preço atrativo ou até sendo os mais baratos do mercado. Também o desenvolvimento das pequenas células solares orgânicas denominadas de OPV (Células Fotovoltaicas Orgânicas – *Organic Photovoltaic Cells*), origina-se de um substrato de vidro com uma eficiência de conversão de 25%, a maior eficiência fotovoltaica até então conseguida e com painéis OPV de teste com um substrato de revestimento de PET (tereftalato de polietileno) (ECP, 2020; PE, 2020).

É importante destacar que há um forte crescimento na instalação de parques eólicos offshore que tem atraído o interesse dos principais investimentos em projetos eólicos. Isto se deve a uma produção de eletricidade maximizada pela instalação de turbinas eólicas de potências significativamente superior aos projetos terrestres, isso faz que sejam alcançados custos inferiores de manutenção por MW.

Outra vantagem dos projetos *offshore* é a característica do vento que se baseia em velocidades constantes e lamelares sendo possível explorar esse recurso de forma eficiente, além do transporte marítimo, que não apresenta limitações. Dessa forma, os aerogeradores de energia têm muita facilidade para funcionar e conseqüentemente gerar energia constante, mas que a energia gerada nas plantas em terra (ECP, 2020).

Atualmente e em particular, o Brasil tem investido em energias renováveis. No mundo, são mais de 80 países que neste momento usam a energia eólica como recurso para produção de eletricidade. Apesar da energia eólica ter algumas desvantagens, ela tem sido a mais procurada em boa parte do mundo, pois anualmente observando-se um crescimento de 25% dessa fonte de energia elétrica.

O desenvolvimento e aprimoramento de novas tecnologias é extremamente importante para a construção de projetos de energia renovável. Além disso, estes fatores contribuem para a qualidade da energia elétrica disponível aos consumidores e distribuidores de energia. O gerenciamento da energia injetada na rede, produzida por essas fontes intermitentes, são resultado da maior parte das fontes renováveis (COSTA, 2017).

APÊNDICE B — GERAÇÃO EÓLICA DE ENERGIA ELÉTRICA

A geração de energia eólica está diretamente ligada à velocidade do vento e, também, diretamente relacionada ao melhor desempenho da turbina eólica. De acordo com a literatura, se a velocidade do vento dobrar, a potência aumentará oito vezes, conforme a equação (61) (JOHNSON et al., 2006).

$$C_p = \frac{P}{P_{vento}} \quad (61)$$

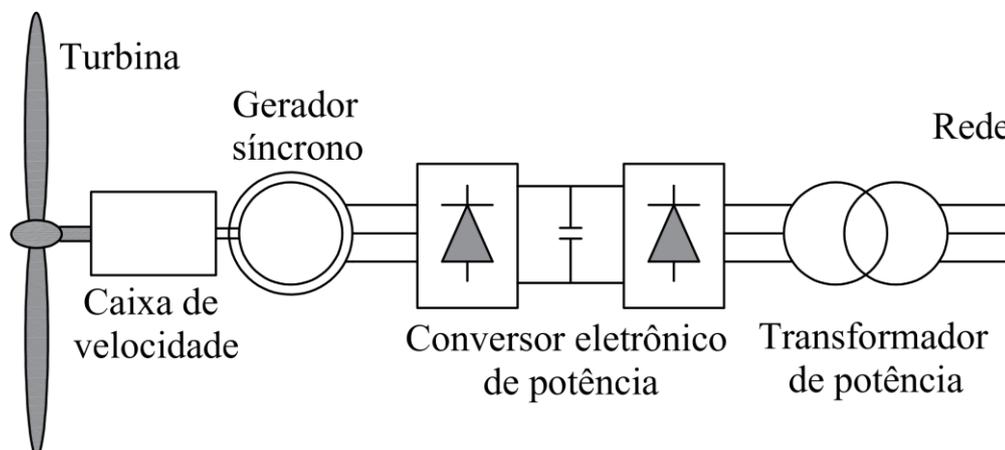
O coeficiente de potência C_p é definido como a relação entre a potência aerodinâmica do rotor P e a potência P_{vento} disponível pelo vento (JOHNSON, 2006).

Idealmente, o vento deve sempre ter uma velocidade constante, o que, na prática, não acontece, e são necessários alguns acessórios adicionais (JOHNSON, 2006). Para tanto, a implementação da geração de energia a partir da fonte eólica pode ter várias abordagens. O diferencial está em relação às máquinas elétricas utilizadas e às topologias utilizadas nos conversores de energia e nos circuitos de controle.

Em particular, a geração de eletricidade a partir da velocidade do vento leva em consideração quatro bandas de controle de velocidade. No primeiro nível de controle a velocidade vai de zero à velocidade mínima de geração. Nesse caso, a energia gerada supre apenas as perdas por atrito e mantém a turbina eólica girando (WANG et al., 2014). A segunda é a operação normal, quando o passo da lâmina da turbina é ajustado em aproximadamente 45° na direção do vento. A terceira faixa é aquela em que acontecem velocidades excessivas de vento, exigindo um controle dos passos da lâmina da turbina para que a energia seja mantida dentro dos limites de uma faixa regular e máxima. Quando a velocidade do vento atinge uma velocidade excessiva, em torno de 30 m/s, as pás são orientadas em direção ao vento para evitar danos mecânicos à turbina eólica (FARRET, 2010).

A constituição de turbinas eólicas convencionais pode ser dividida em duas partes, uma elétrica e outra mecânica. Na parte mecânica, a energia cinética do vento é extraída da natureza, convertida em rotação e transferida para um gerador elétrico (ASMINE et al., 2011). Nos aerogeradores modernos, a energia elétrica assim produzida é geralmente manipulada por conversores eletrônicos de potência para que a energia possa ser fornecida à rede elétrica sob condições de consumo, como a mostrada na Figura A.4.

Figura A.4 — Configuração básica da geração de energia eólica



Fonte: Adaptado de (CHIMURKAR; KOTHAVADE, 2016).

A parte mecânica de uma usina eólica consiste em uma turbina acoplada, ou não, a uma caixa de engrenagens ou a um conversor eletrônico de potência. As pás da turbina recebem o vento dianteiro na direção de 45° e o transformam em energia cinética na forma de uma força mecânica rotativa. Essa força de rotação é aplicada a um gerador de energia elétrica que produz tensão e corrente em uma determinada frequência. É possível aumentar a rotação do gerador acoplando-o a uma caixa de engrenagens (CHIMURKAR; KOTHAVADE, 2016). A segunda parte da turbina eólica é composta por circuitos elétricos e eletrônicos capazes de converter a geração de frequência e tensão em níveis aceitáveis de carga.

Para conectar um gerador de energia eólica à rede elétrica pública é necessário que os níveis de tensão e frequência de saída sejam adaptados pelos subsistemas de conversão e controle de potência e compatíveis com a geração distribuída e, assim, mantidos constantes (JOHNSON et al., 2006).

A. Modelagem Aerodinâmica

Para estudar a capacidade aerodinâmica das turbinas é habitual calcular a potência mecânica e o torque disponível no eixo do gerador elétrico por meio de modelos matemáticos. Esses modelos geralmente consideram as várias velocidades do vento e os diferentes ângulos de inclinação das hélices. Esses modelos variam de acordo com o tipo da turbina eólica utilizada (eixo vertical ou horizontal, número de hélices, controle do ângulo da pá, etc.). Os tipos de

gerador elétrico e os controles de velocidade usados nos conversores podem ser representados em detalhes por modelos aerodinâmicos de turbinas (ASMINE et al., 2011).

As equações (62), (63) e (64) descrevem o torque mecânico (T_m), a potência mecânica (P_m) e a potência disponível do vento (JOHNSON et al., 2006; SALLES, 2009).

$$T_m = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot V_w^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (62)$$

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot V_w^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (63)$$

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \rho \cdot V_w^3 \quad (64)$$

onde:

T_m = Torque mecânico (N.m);

P_m = Potência mecânica (W);

A = Área varrida pelas hélices das turbinas em (m²);

ρ = Densidade do ar em (kg/m³);

V_w = Velocidade do vento (m/s);

C_p = Coeficiente de potência;

λ = Relação de velocidade linear ($\omega_m \cdot R / V_w$);

β = Ângulo de inclinação da hélice da turbina (graus);

ω_m = Velocidade angular da turbina (rad/s).

A eficiência com que a turbina eólica transforma a energia cinética dos ventos em energia mecânica é representada pelo coeficiente C_p que é o único fator manipulável em relação aos demais. A modelagem e a simulação dinâmica de um rotor de energia eólica e o torque usando as equações (62) e (63) são bastante aceitáveis na fase de projeto para prever o comportamento mecânico da geração eólica, principalmente com base nas velocidades do vento (SALLES, 2009).

APÊNDICE C — CÁLCULO DOS CAPACITORES PARA SIMULAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO

Para determinar o valor do banco de capacitores para as simulações do capítulo 4, utiliza-se o seguinte cálculo:

Dados do motor: 4 polos, 0,46 CV, 0,34 kW, 1,75 A e tensão de linha de 220 V.

A potência aparente consumida pela máquina quando ela opera como um motor é:

$$S = \sqrt{3}.V.I$$

$$S = \sqrt{3}.220.1,75$$

$$S = 667VA$$

A potência ativa absorvida correspondente é:

$$P = S.\cos\theta$$

$$P = 340W$$

A reatância capacitiva por fase é:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$Q = 574VAr$$

A capacitância por fase deve ter um valor mínimo de $574/3 = 192$ VAr

Considerando que os capacitores estão ligados em Y, a corrente capacitiva por fase é:

$$I_c = \frac{Q}{V} = \frac{192}{220} = 0,86A$$

A reatância capacitiva por fase é: $X_c = \frac{V}{I} = 256\Omega$

A capacitância por fase deve ter um valor mínimo de:

$$C = \frac{1}{2\pi.X_c} = 10\mu F$$

APÊNDICE D — DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA OS MOTORES DE INDUÇÃO

No capítulo 3 foram apresentadas como multiplicar a frequência de saída de qualquer tipo de gerador elétrico usando máquinas elétricas com números diferentes de polos e acionadas mecanicamente por um eixo comum. Considerando os limites de cada máquina foram realizados os ensaios a vazio e de rotor bloqueado, bem como o ensaio de corrente contínua para medir os parâmetros do enrolamento de estator.

A seguir são apresentados os valores obtidos em laboratório durante os ensaios citados, para cada um dos motores.

A Tabela A.1, A.2, A.3 e A.4, mostram os resultados de ensaios para cada uma das máquinas de indução com rotor gaiola de esquilo.

Tabela A.1 — Resultado de ensaios para motor de 2 polos e 3/4 CV

Ensaio a vazio, velocidade 1780 rpm, 60 Hz		
V_F (V)	I_F média (A)	P entrada (W)
28	0,2	10
50	0,26	20
82	0,3	28
172	0,4	59
272	0,62	124
330	0,84	193
350	0,96	231
422	1,73	474
Ensaio de rotor bloqueado, 15 Hz		
61	1,6	106
Ensaio em corrente contínua		
V_{CC} (V)	I_{CC} (A)	R_S (Ω)
26,9	1,6	8,4

Fonte: Autor.

Tabela A.2 — Resultado de ensaios para motor de 4 polos e 0,46 CV

Ensaio a vazio, velocidade 1780 rpm, 60 Hz		
V_F (V)	I_F média (A)	P entrada (W)
10	0,8	19
30	0,47	26
60	0,46	30
100	0,6	47
130	0,73	74
160	0,92	87
190	1,16	121
220	1,43	167
Ensaio de rotor bloqueado, 15 Hz		
33	1,75	100
Ensaio em corrente contínua		
V_{CC} (V)	I_{CC} (A)	R_s (Ω)
46,2	1,75	13,2

Fonte: Autor.

Tabela A.3 — Resultado de ensaios para motor de 6 polos e 0,38 CV

Ensaio a vazio, velocidade 1780 rpm, 60 Hz		
V_F (V)	I_F média (A)	P entrada (W)
10	0,45	11
30	0,31	15
60	0,36	20
100	0,5	33
130	0,68	48
160	0,83	66
190	1,0	90
220	1,2	119
Ensaio de rotor bloqueado, 15 Hz		
51	1,55	128
Ensaio em corrente contínua		
V_{CC} (V)	I_{CC} (A)	R_s (Ω)
26,6	1,56	8,52

Fonte: Autor.

Tabela A.4 — Resultado de ensaios para motor de 8 polos e 0,25 CV

Ensaio a vazio, velocidade 1780 rpm, 60 Hz		
V_F (V)	I_F média (A)	P entrada (W)
36	0,15	11
80	0,15	18
145	0,20	23
211	0,27	34
250	0,33	44
330	0,44	69
400	0,51	96
429	0,56	109
Ensaio de rotor bloqueado, 15 Hz		
170	0,69	154
Ensaio em corrente contínua		
V_{cc} (V)	I_{cc} (A)	R_s (Ω)
92	0,63	73

Fonte: Autor.

Com os dados obtidos nos ensaios, é possível encontrar os parâmetros aproximados do motor de indução, os cálculos são baseados no método proposto por (CHAPMANN, 2013).

O exemplo de cálculo é demonstrado para o motor de quatro polos e potência de 0,46 CV:

Ensaio em corrente contínua pode ser achado a resistência de estator R_l :

$$R_l = \frac{V_{cc}}{2I_{cc}} = \frac{46,2}{2(1,75)} = 13,2\Omega$$

Do ensaio a vazio se obtém a corrente média e a tensão de fase

$$I_{L,média} = \frac{1,43 + 1,42 + 1,44}{3} = 1,43A$$

$$V_{\phi vz} = \frac{220V}{\sqrt{3}} = V_{\phi vz} = \frac{220V}{1,73A} = 127V$$

Desta forma, a impedância a vazio é

$$Z_{vz} = \frac{127V}{1,43A} = 88,8\Omega = X_l + X_m$$

Quando X_1 é conhecida, X_m pode ser encontrada. As perdas no cobre do estator são:

$$P_{PCE} = 3.I_1^2.R_1 = 3.(1,43A)^2.(13,2\Omega) = 80,97W$$

onde as perdas rotacionais a vazio são:

$$P_{rot} = P_{entrada,vz} - P_{PCE,vz} \text{ Resulta, } 167 W - 80,97 W = 86,03 W$$

Do ensaio de rotor bloqueado tem-se:

$$I_{L,m\acute{e}dia} = \frac{1,75 + 1,75 + 1,75}{3} = 1,75A$$

A impedância de rotor bloqueado é:

$$Z_{RB} = \frac{V_\phi}{I_A} = \frac{V_T}{\sqrt{3}.I_A} = \frac{33,6V}{\sqrt{3}.(1,75A)} = 11,08\Omega$$

E o Ângulo de impedância θ é:

$$\begin{aligned} \theta &= \arccos \theta \frac{P_{entrada}}{\sqrt{3}V_T I_L} \\ &= \arccos \theta \frac{100W}{\sqrt{3}.(33,6V).(1,75 A)} \\ &= \arccos 0,98 = 11,47^\circ \end{aligned}$$

Portanto, $R_{RB} = 11,8 \Omega \cos 11,47^\circ = 11,56 \Omega = R_1 + R_2$. Como $R_1 = 13,2 \Omega$, então R_2 deve ser $1,64 \Omega$. A reatância em 15 HZ é

$$X_{RB} = 11,8 \text{ sen } 11,47^\circ = 2,35 \Omega$$

A reatância equivalente em 60 Hz é

$$X_{RB} = \frac{f_{nominal}}{f_{ensaio}} X'_{RB} = \left(\frac{60Hz}{15Hz} \right) 2,35\Omega = 9,4\Omega$$

Nos motores de indução da classe A, assume-se que essa reatância é dividida igualmente entre o rotor e o estator, de modo que:

$$X_l = X_2 = 4,7 \Omega$$

$$X_m = Z_{vz} - X_l = 11,08 \Omega - 4,7 \Omega = 6,38 \Omega$$

A indutância de magnetização é, portanto:

$$X_m = 2\pi \cdot f \cdot l$$

Portanto, parâmetros de simulação são: $R_s = 13,2 \Omega$, $R_r = 1,64 \Omega$, $L_s = 12,46 \text{ mH}$, $L_r = 12,46 \text{ mH}$ e $L_m = 16,9 \text{ mH}$.